

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

ROBERTA MIGUEL KISKA FILIPPINI

SUBSÍDIOS PARA DIRETRIZES CORPORATIVAS VISANDO A GESTÃO DAS  
EMISSÕES DE GASES DE EFEITO ESTUFA EM UM PRESTADOR DE SERVIÇOS  
DE SANEAMENTO DO ESTADO DO PARANÁ

CURTIBA

2018

ROBERTA MIGUEL KISKA FILIPPINI

SUBSÍDIOS PARA DIRETRIZES CORPORATIVAS VISANDO A GESTÃO DAS  
EMISSÕES DE GASES DE EFEITO ESTUFA EM UM PRESTADOR DE SERVIÇOS  
DE SANEAMENTO DO ESTADO DO PARANÁ

Dissertação apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Meio Ambiente Urbano e Industrial, Setor de Tecnologia, da Universidade Federal do Paraná, em parceria com o Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial (SENAI) e com a *Universität Stuttgart*, Alemanha, com o requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Meio Ambiente Urbano e Industrial.

Orientadora: Profa. Dra. Karen Juliana do Amaral

Coorientadores: Profa. Dra. Daniela Neuffer e Dr. Gustavo Rafael Collere Possetti

CURITIBA

2018

Catálogo na Fonte: Sistema de Bibliotecas, UFPR  
Biblioteca de Ciência e Tecnologia

F483s

Filippini, Roberta Miguel Kiska

Subsídios para diretrizes corporativas visando a gestão das emissões de gases de efeito estufa em um prestador de serviços de saneamento do estado do Paraná / Roberta Miguel Kiska Philippini. – Curitiba, UFPR : SENAI : Universität Stuttgart, Alemanha, 2018.

Dissertação - Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia , Programa de Pós-Graduação em Meio Ambiente Urbano e Industrial, 2018.

Orientadora: Karen Juliana do Amaral . - Coorientadores: Daniela Neuffer e Gustavo Rafael Collere Possetti

1. Gases do efeito estufa. 2. Esgotos x Aspectos ambientais. 3. Metano. 4. Mudanças climáticas. 5. Saneamento. I. Universidade Federal do Paraná. II. SENAI. III. Universität Stuttgart. IV. Amaral, Karen Juliana. V. Neuffer, Daniela. VI. Possetti, Gustavo Rafael Collere. VII. Título.

CDD: 363.73874

Bibliotecária: Vanusa Maciel - CRB - 9/1928



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
SETOR SETOR DE TECNOLOGIA  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ  
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO MEIO AMBIENTE  
URBANO E INDUSTRIAL

## TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em MEIO AMBIENTE URBANO E INDUSTRIAL da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da dissertação de Mestrado de ROBERTA MIGUEL KISKA FILIPPINI intitulada: SUBSÍDIOS PARA DIRETRIZES CORPORATIVAS VISANDO A GESTÃO DAS EMISSÕES DE GASES DE EFEITO ESTUFA EM UM PRESTADOR DE SERVIÇOS DE SANEAMENTO DO ESTADO DO PARANÁ, após terem inquirido a aluna e realizado a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua aprovação no rito de defesa.

A outorga do título de mestre está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.

Curitiba, 30 de Julho de 2018.

KAREN JULIANA DO AMARAL  
Presidente da Banca Examinadora

PATRICIA BILOTTA  
Avaliador Externo

ANDREAS FRIEDRICH GRAUER  
Avaliador Interno

DANIELA NEUFFER  
Avaliador Interno

GUSTAVO RAFAEL COLLERE POSSETTI  
Avaliador Externo

Aos estudantes e interessados do  
setor de saneamento.



## **AGRADECIMENTOS**

À minha filha, Giovanna, que de dentro do meu ventre me acompanhou em todas as aulas. Ao Rodrigo, por toda paciência, admiração, apoio e os cuidados com a Gio. Aos meus pais, pelo exemplo e valores passados, dedico essa conquista.

À minha orientadora, Karen, pelo conhecimento, pela dedicação de corrigir cada vírgula e considerações que contribuíram para melhorar esse trabalho.

Ao Gustavo, meu co-orientador, quem me motivou para dar início aos estudos. Um exemplo de dedicação e sabedoria.

Ao meu gerente, Pedro, que sempre acreditou em mim, pelo tempo disponibilizado para que eu pudesse executar esse trabalho.

Aos meus colegas, Thaisa, Aliny, Nilo e Nicolás, pelas reflexões e contribuições.

À professora Daniela, pelas análises realizadas que enriqueceram esse trabalho.

Ao professor Adalberto Noyola Robles pelos ensinamentos e esclarecimentos nas trocas de email.

Ao professor Arno Paulo Schmitz pela disponibilidade e considerações.

Ao Marcos Pupo Thiesen pela troca de conhecimentos durante o mini-curso de Mercado de Carbono e pelo empenho em ler e colaborar com este trabalho.

Aos membros da banca, professora Patrícia e professor Andreas, por aceitarem meu convite prontamente e por cada anotação às quais contribuíram para tornar o trabalho mais completo.

À todos vocês, por acreditarem no meu potencial.

“Cada escolha, uma oportunidade.  
Cada queda, um aprendizado. Cada  
atitude, uma consequência. ”

(Desconhecido)

## RESUMO

O setor de resíduos, composto pela disposição de resíduos sólidos e pelo tratamento de esgoto, é responsável por 4% das emissões de gases de efeito estufa (GEE) brasileiras. O atual cenário mundial traz à tona a necessidade de reconhecer as mudanças climáticas como componente obrigatório da visão estratégica corporativa, encontrando meios de mitigação e adaptação aos seus efeitos. Sendo assim o objetivo desse trabalho é elaborar subsídios para diretrizes corporativas visando à gestão das emissões de GEE em um prestador de serviço de saneamento do Estado do Paraná. Como o tratamento de efluentes, em 2015, representou mais de 90% das emissões diretas do prestador de serviço, o trabalho analisou o potencial de mitigação das emissões de GEE provenientes dessa categoria até o ano de 2030, considerando as metas dos Planos Municipais de Saneamento Básico para expansão dos serviços e o crescimento populacional. Foi possível concluir que o emprego de tecnologias ainda incipiente entre os prestadores de serviços de saneamento no Brasil torna possível a redução de emissões de GEE nos processos de tratamento de efluentes, chegando a quase 25% de redução nos cenários II, VI e VII. Com relação ao indicador de intensidade carbônica, os cenários que se mostram mais favoráveis são os cenários VII, II e VI, que apresentaram valores de 0,137; 0,114 e 0,110 tCO<sub>2</sub>e·hab<sup>-1</sup> respectivamente. Com relação ao custo por tonelada de CO<sub>2</sub> evitada, o cenário IV é o mais favorável devido à receita de R\$ 51,41·a<sup>-1</sup> proporcionada pela compensação de energia elétrica gerada na rede, seguido dos cenários III e II. Baseados nesses resultados foi construído um roteiro para que o prestador de serviço possa gerenciar suas emissões de GEE e realizar suas atividades com baixo carbono emitido. Além disso, foram propostas algumas diretrizes gerais e identificados os riscos e oportunidades que devem ser considerados nos processos de tomada de decisão das alternativas.

**Palavras-chave:** Gases de efeito estufa. Mitigação de emissões. Potencial de redução. Tratamento de esgoto.



## ABSTRACT

The waste sector, consisting of solid waste disposal and sewage treatment, is responsible for 4% of Brazilian GHG emissions. The current global scenario brings to light the need to recognize climate change as a mandatory component of the corporate strategic vision, finding means of mitigation and adaptation to its effects. Therefore, the objective of this work is to elaborate subsidies for corporate guidelines aimed at the management of GHG emissions in a sanitation service provider in the State of Paraná. As effluent treatment in 2015 represented more than 90% of the direct emissions of the service provider, the work analyzed the potential of mitigation of GHG emissions from this category until the year 2030, considering the targets of the Municipal Sanitation Plans Basic for expansion of services and population growth. It was possible to conclude that the still incipient use of technologies among sanitation service providers in Brazil makes it possible to reduce GHG emissions in effluent treatment processes, reaching almost 25% reduction in scenarios II, VI and VII. Regarding the carbon intensity indicator, the scenarios that are most favorable are scenarios VII, II and VI, which presented values of 0,137; 0,114 and 0,110 tCO<sub>2</sub>e·hab<sup>-1</sup> respectively. Regarding the cost per tonne of CO<sub>2</sub> avoided, scenario IV is the most favorable due to the R\$ 51,41·year<sup>-1</sup> revenue provided by the net electricity compensation generated in the network, followed by scenarios III and II. Based on these results, a roadmap was developed so that the service provider can manage its GHG emissions and carry out its activities with low carbon emissions. In addition, some general guidelines were proposed and the risks and opportunities that should be considered in the decision-making processes of the alternatives were identified.

**Key words:** Greenhouse gases. Emission mitigation. Reduction potential. Sewage treatment.

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – FONTES DE EMISSÕES DE GEE DURANTE O FLUXO DE COLETA E TRATAMENTO DE EFLUENTES.....	41
FIGURA 2 – FLUXOGRAMA DO MÉTODO PBGHGP .....	47
FIGURA 3 – POTENCIAL DE APROVEITAMENTO DE BIOGÁS EM UMA ETE ANAERÓBIA .....	58
FIGURA 4 – QUEIMADOR ABERTO .....	64
FIGURA 5 – QUEIMADOR ENCLAUSURADO .....	65
FIGURA 6 – ROTEIRO PARA IMPLANTAR UMA GESTÃO DE EMISSÕES DE GEE.....	109

## LISTA DE GRÁFICOS

GRÁFICO 1 – EMISSÃO DIRETA DE GEE POR ATIVIDADE EM 2015 .....	90
GRÁFICO 2 – EMISSÃO INDIRETA DE GEE POR ATIVIDADE EM 2015.....	91
GRÁFICO 3 – EMISSÕES TOTAIS PREVISTAS EM 2020 PARA CADA CENÁRIO .....	95
GRÁFICO 4 – EMISSÕES TOTAIS PREVISTAS EM 2025 PARA CADA CENÁRIO .....	96
GRÁFICO 5 – EMISSÕES TOTAIS PREVISTAS EM 2030 PARA CADA CENÁRIO .....	96
GRÁFICO 6 – REDUÇÃO DAS EMISSÕES PREVISTAS EM 2020, 2025 E 2030 EM RELAÇÃO À LINHA DE BASE DE CADA ANO.....	98
GRÁFICO 7 – REDUÇÃO DE EMISSÕES E CUSTO POR TCO <sub>2</sub> EVITADA POR CENÁRIO PROPOSTO .....	101
GRÁFICO 8 – CUSTO MARGINAL DE ABATIMENTO POR ETE DO CENÁRIO II .....	103
GRÁFICO 9 – DETALHES DA CURVA DE CUSTO MARGINAL DE ABATIMENTO POR ETE DO CENÁRIO II.....	103
GRÁFICO 10 – CUSTO MARGINAL DE ABATIMENTO POR ETE DO CENÁRIO III .....	104
GRÁFICO 11 – CUSTO MARGINAL DE ABATIMENTO POR ETE DO CENÁRIO IV .....	105
GRÁFICO 12 – CUSTO MARGINAL DE ABATIMENTO POR ETE DO CENÁRIO V .....	105
GRÁFICO 13 – CUSTO MARGINAL DE ABATIMENTO POR ETE DO CENÁRIO VI .....	106
GRÁFICO 14 – CUSTO MARGINAL DE ABATIMENTO DO CENÁRIO VII.....	107

## LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – POTENCIAL DE AQUECIMENTO GLOBAL (GWP).....	51
TABELA 2 – FATORES DE EMISSÃO DE COMBUSTÍVEIS .....	69
TABELA 3 – FATORES DE EMISSÃO MENSAIS DO SIN DO ANO DE 2015 .....	70
TABELA 4 – PARÂMETROS PARA CÁLCULO CH <sub>4</sub> EM ETES.....	73
TABELA 5 – FATOR MÉDIO DE CONVERSÃO DE CH <sub>4</sub> .....	73
TABELA 6 – EFICIÊNCIA MÍNIMA DE REMOÇÃO DE DBO POR ETAPA DO TRATAMENTO DE EFLUENTES.....	73
TABELA 7 – PARÂMETROS PARA CÁLCULO DE N <sub>2</sub> O EM ETES.....	74
TABELA 8 – CUSTO POR EQUIPAMENTO PARA INSTALAÇÃO DE SISTEMAS DE QUEIMA E APROVEITAMENTO ENERGÉTICO DO BIOGÁS. ....	79
TABELA 9 – CUSTO DE QUEIMADORES .....	79
TABELA 10 – CUSTO E EFICIÊNCIA DO MOTOGERADOR.....	79
TABELA 11 – CUSTO GASÔMETRO.....	80
TABELA 12 – CUSTO PARA INSTALAÇÃO, OPERAÇÃO E MANUTENÇÃO DE SISTEMAS DE TRATAMENTO BASEADO EM EFICIÊNCIA....	81
TABELA 13 – DIAGNÓSTICO DAS ETEs DO PRESTADOR DE SERVIÇO DE SANEAMENTO .....	86
TABELA 14 – PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS PREVISTAS EM CADA ANO..	86
TABELA 15 – LEVANTAMENTO DE EQUIPAMENTOS DE COMBUSTÃO MÓVEL.....	89
TABELA 16 – LEVANTAMENTO DE EQUIPAMENTOS DE EMISSÃO FUGITIVA.....	89
TABELA 17 – CLASSIFICAÇÃO DAS ETES COM RELAÇÃO ÀS EMISSÕES DE GEE.....	91
TABELA 18 – NÚMERO DE EQUIPAMENTOS EM CADA CENÁRIO DE MITIGAÇÃO .....	92
TABELA 19 – RESULTADOS DOS CENÁRIOS DE MITIGAÇÃO DE EMISSÕES DE GEE .....	94
TABELA 20 – POTENCIAL ENERGÉTICO DAS ETEs EM 2030 .....	99
TABELA 21 – CUSTO DE INVESTIMENTO POR CENÁRIO EM R\$ .....	100

TABELA 22 – RISCOS E OPORTUNIDADES DE IMPLANTAÇÃO DE GESTÃO  
DE GEE NUM PRESTADOR DE SERVIÇOS DE SANEAMENTO 109

## LISTA DE QUADROS

QUADRO 1 – CRITÉRIOS SELECIONADOS PARA A GESTÃO DE GEE NA INDÚSTRIA.....	35
QUADRO 2 – RISCOS E OPORTUNIDADES NA ECONOMIA DE BAIXO CARBONO .....	37
QUADRO 3 – CRITÉRIOS DE DEFINIÇÃO DE LIMITES OPERACIONAIS.....	48
QUADRO 4 – COMPARATIVO DAS VANTAGENS ENTRE OS TIPOS DE QUEIMADORES .....	63
QUADRO 5 – CAPACIDADE DE GÁS REFRIGERANTE E FATORES DE EMIÇÃO POR TIPO DE EQUIPAMENTO .....	71
QUADRO 6 – PARÂMETROS ESPECÍFICOS DEFINIDOS PARA OS ATERROS SANITÁRIOS .....	72
QUADRO 7 – CARACTERÍSTICAS DEFINIDAS EM CADA CENÁRIO .....	77
QUADRO 8 – COMPONENTES COMPLEMENTARES NOS SISTEMAS DE CAPTURA, QUEIMA E APROVEITAMENTO DO BIOGÁS .....	78
QUADRO 9 – MATRIZ DAS EMISSÕES DE GEE.....	87



## LISTA DE SIGLAS

CDP – *Carbon Disclosure Project*

CH<sub>4</sub> – Metano

CMA – Custo Marginal de Abatimento

CNI - Confederação Nacional da Indústria

CO<sub>2</sub> – Dióxido de carbono

ETA – Estação de Tratamento de Água

ETE – Estação de Tratamento de Efluentes

GEE – Gases de Efeito Estufa

GRI - *Global Reporting Initiative*

GWP – Potencial de Aquecimento Global

IARCE – Índice de atendimento com rede coletora de esgoto

IEs – Instrumentos econômicos

IGEE – Inventário de Gases de Efeito Estufa

IPCC – Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas

ISE – Índice de Sustentabilidade Empresarial

LB – Cenário Linha de Base

MCF – Fator de correção do metano

MCTIC – Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações

N<sub>2</sub>O – Óxido nitroso

NDC – Contribuições Nacionalmente Determinadas

ONU – Organização das Nações Unidas

PBGHGP – Programa Brasileiro GHG Protocol

Plansab – Plano Nacional de Saneamento Básico

PEMC - Política Estadual de Mudanças Climáticas

PNMC – Política Nacional de Mudanças do Clima

RAC – Equipamentos de refrigeração e ar-condicionado

SEEG – Sistema de Estimativas de Emissões de Gases de Efeito Estufa

SIN – Sistema Interligado Nacional

SISWEB – Sistema de Informações e Gestão da Sanepar

tCO<sub>2</sub>e – tonelada de dióxido de carbono equivalente

UASB – Reator anaeróbio de manta de lodo

UNFCCC – Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudanças Climáticas

WRI - *World Resources Institute*

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>19</b>
1.1	JUSTIFICATIVA.....	22
1.2	OBJETIVOS .....	23
1.2.1	Objetivo geral .....	23
1.2.2	Objetivos específicos.....	23
<b>2</b>	<b>REVISÃO DE LITERATURA.....</b>	<b>24</b>
2.1	COBERTURA DOS SERVIÇOS DE SANEAMENTO NO BRASIL E NO PARANÁ.....	24
2.2	MUDANÇAS CLIMÁTICAS.....	26
2.2.1	Legislação .....	29
2.2.2	Instrumentos de política ambiental .....	30
2.3	EMISSÕES DE GASES DE EFEITO ESTUFA E O TRATAMENTO DE EFLUENTES .....	38
2.3.1	Emissões de gases de efeito estufa no tratamento biológico anaeróbio .....	41
2.3.2	Emissões de gases de efeito estufa no tratamento biológico aeróbio .....	43
2.4	CONTABILIZAÇÃO DE EMISSÕES DE GASES DE EFEITO ESTUFA.....	44
2.4.1	Programa Brasileiro GHG Protocol.....	45
2.4.2	Guia do Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas para Inventários Nacionais de Gases de Efeito Estufa .....	51
2.5	MEDIDAS DE MITIGAÇÃO DE GASES DE EFEITO ESTUFA NO TRATAMENTO DE EFLUENTES .....	56
2.5.1	Aproveitamento energético do biogás .....	57
2.5.2	Queima do biogás.....	63
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>66</b>
3.1	DIAGNÓSTICO DA COBERTURA DOS SERVIÇOS DE SANEAMENTO NO PARANÁ.....	66
3.2	ESTIMATIVA DAS EMISSÕES DE GASES DE EFEITO ESTUFA.....	68
3.3	CENÁRIOS DE MITIGAÇÃO DE EMISSÕES DE GASES DE EFEITO ESTUFA .....	75
3.3.1	Levantamento de custos.....	79
3.3.2	Análise de cenários .....	82
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>85</b>

4.1	DIAGNÓSTICO DA COBERTURA DOS SERVIÇOS DO PRESTADOR DE SERVIÇO DE SANEAMENTO .....	85
4.2	ESTIMATIVA DAS EMISSÕES DE GASES DE EFEITO ESTUFA.....	87
4.3	CENÁRIOS DE MITIGAÇÃO DE EMISSÕES DE GASES DE EFEITO ESTUFA .....	92
4.3.1	Investimentos necessários para cada cenário.....	99
4.3.2	Análise dos cenários de mitigação .....	101
4.4	DIRETRIZES PARA UMA POLÍTICA DE BAIXO CARBONO .....	108
4.4.1	Combustão móvel e estacionária .....	111
4.4.2	Emissões fugitivas .....	112
4.4.3	Emissões de metano provenientes do tratamento de efluentes .....	112
4.4.4	Emissões de metano provenientes dos aterros sanitários.....	113
4.4.5	Energia elétrica.....	113
4.4.6	Compensação .....	113
<b>5</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>115</b>
5.1	TRABALHOS APRESENTADOS.....	117
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>118</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Muitos avanços institucionais, políticos e legais foram observados entre as conferências mundiais sobre o meio ambiente realizadas pela Organização das Nações Unidas (ONU) em Estocolmo (1972), no Rio de Janeiro (1992 e 2012), em Joanesburgo (2002) e por fim em Nova York (2015), com a inclusão da temática ambiental na agenda das nações, das instituições e dos cidadãos (MMA, 2017).

Apesar dos avanços, o agravamento dos problemas ambientais persistiu configurado, segundo Metzger (2007), em três grandes crises globais: mudanças climáticas, extinção de espécies nativas, degradação e esgotamento dos recursos hídricos.

Embora o Protocolo de Quioto criado em 1997 no Japão, em vigor desde 2005, tivesse como metas as reduções das emissões de gases de efeito estufa (GEE), um balanço da secretaria da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudanças Climáticas (UNFCCC, sigla em inglês) destacou que apenas 37 países dos 189 que ratificaram o pacto, a maioria europeus, superaram sua meta de reduzir em 5% suas emissões até 2012 (UNFCCC, 2017). Além disso, nas últimas décadas, as evidências das mudanças climáticas estão mais fortes. O último Relatório de Avaliação sobre Mudanças Climáticas Globais do Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (IPCC) da ONU, publicado em 2014, apontou que as atividades antrópicas são as principais contribuintes para o aumento do aquecimento global e, conseqüentemente, para eventos climáticos extremos (IPCC, 2014).

Em colaboração com o esforço mundial de redução das emissões de GEE, no ano de 2009, foi instituída a Política Nacional sobre Mudança do Clima (PNMC), por meio da Lei Federal nº12.187/2009. A PNMC oficializou o compromisso voluntário do Brasil junto à UNFCCC para redução de emissões de GEE no país (BRASIL, 2009).

Na Convenção de Clima da ONU em 2015 em Paris, a pressão pública fez com que ministros de 195 países alinhassem metas para redução de GEE. Nesse evento, o Brasil se comprometeu a reduzir suas emissões de GEE em 37% abaixo dos níveis de 2005, até 2025. Além disso, o governo brasileiro acordou uma contribuição indicativa subsequente de redução de 43% abaixo dos níveis de emissão de 2005, até 2030 (BRASIL, 2017b).

O setor de resíduos, responsável pelas emissões oriundas da disposição de resíduos sólidos e pelo tratamento de esgoto, foi responsável por 3,3% das emissões brasileiras em 2015, pela avaliação do Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação, conforme dados apresentados pelo Sistema de Estimativas de Emissões de Gases de Efeito Estufa (SEEG) (SEEG, 2016).

As emissões da disposição de resíduos sólidos e do tratamento de esgotos domésticos variam basicamente em função do aumento da população atendida por esses serviços. Dados do SEEG (2016) mostram que a disposição em aterros sanitários possui potencial de geração de metano 20% maior do que a disposição em aterros controlados. Já o tratamento de efluentes em reatores anaeróbios possui o potencial de geração de metano oito vezes maior que aquele inerente ao lançamento em corpos d'água (SEEG, 2016), aspecto positivo considerando que o metano possui potencial energético e pode ser aproveitado.

Com a universalização dos serviços de saneamento, atendimento de toda população, prevista no Plano Nacional de Saneamento Básico (Plansab), há uma perspectiva de aumento das emissões de GEE nesse setor (BRASIL, 2013). Mesmo que ainda não haja um Plano Setorial para redução das emissões do setor de resíduos, o atual cenário traz à tona a necessidade de reconhecer as mudanças climáticas como componente obrigatório da visão estratégica corporativa, encontrando meios de mitigação e adaptação aos seus efeitos (FILIPPINI *et al.*, 2018).

No âmbito do Estado do Paraná, em 2005, criou-se o Fórum Paranaense de Mudanças Climáticas para promover discussões acerca dos problemas relacionados às mudanças climáticas e elaborar de forma participativa políticas públicas para enfrentamento dos problemas associados ao tema. A Política Estadual de Mudanças Climáticas (PEMC), entretanto, só foi instituída em 2012, pela Lei nº 17.133, e estabelece princípios, objetivos, instrumentos e diretrizes objetivando ações de mitigação de emissões antrópicas e medidas de adaptação para reduzir os efeitos adversos das mudanças climáticas (PARANÁ, 2012).

De modo a auxiliar a definição de estratégias para gestão das emissões no Estado, um dos instrumentos criados para operacionalizar a PEMC é o Registro Público de Emissões de Gases de Efeito Estufa, uma plataforma *online* de reporte de inventários de caráter voluntário. E para incentivo, foram criados os selos Clima Paraná, uma certificação para as empresas que realizarem o registro público de



suas emissões de GEE. Cada categoria corresponde ao nível de verificação dos inventários e a empresa ainda pode prorrogar por um ano sua licença de operação (SEMA, 2017).

No Paraná, o prestador de serviços de abastecimento de água tratada, de coleta e tratamento de esgoto sanitário, e ainda, de coleta e destinação de resíduos sólidos divulga anualmente seu Inventário de Emissões de Gases de Efeito Estufa (IGEE). No último IGEE divulgado, referente ao ano de 2016, as atividades do prestador de serviço foram responsáveis pela emissão direta de 1.159.775,6 CO<sub>2</sub>e (toneladas de dióxido de carbono equivalente). As estações de tratamento de esgoto (ETE) foram responsáveis por 95,34% dessas emissões e a disposição final de resíduos sólidos por 4,06%. Nesse mesmo ano, o índice de cobertura de coleta de esgoto nos municípios paranaenses atendidos pelo prestador de serviços foi de 69,1%, sendo que 100% do que foi coletado foi tratado (SANEPAR, 2017).

A maioria das ETES do Paraná são plantas anaeróbias, isto é, tecnologia que gera biogás na decomposição da matéria orgânica. O biogás é composto principalmente por metano (CH<sub>4</sub>), o qual possui alto potencial de aquecimento global, 28 vezes maior que o dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) (IPCC, 2014). Assim, uma das maneiras de mitigar a emissão de GEE é utilizar o biogás para fins energéticos, transformando o metano em CO<sub>2</sub> por meio de um processo de combustão. Esse aproveitamento já está amplamente fundamentado na literatura. Estudos de Silva (2015) e Lobato (2011) avaliaram o potencial energético do biogás em reatores anaeróbios e tiveram resultados promissores, mostrando que a recuperação do biogás em ETES pode trazer benefícios econômicos, sociais e ambientais.

No entanto, há poucos estudos de avaliação do potencial de redução de emissões de GEE no setor de saneamento. Lupatini *et al.* (2015) analisaram a região Norte do Paraná e verificaram potencial de redução das emissões de GEE entre 19 e 72% nos cenários de mitigação propostos. No entanto, os autores recomendaram o levantamento detalhado de custos para auxiliar gestores na definição de estratégias para gestão dos GEE.

Alguns trabalhos sugerem a gestão corporativa de GEE, como o guia da Confederação Nacional da Indústria (CNI, 2011) com estratégias de baixo carbono, e Magalhães (2013), que avaliou alternativas de baixo carbono para o cenário brasileiro, porém, não há nada direcionado para o setor de saneamento.

Além disso, não há um marco legal no contexto nacional ou estadual com exigências para a redução no setor de saneamento, porém existe uma pressão da sociedade para promoção do desenvolvimento sustentável e a consolidação de uma economia de baixo carbono.

Nesse sentido, propostas para uma economia de baixo carbono são demandas por esse setor, sejam elas inovações nos processos produtivos ou soluções tecnológicas que resultem em menor impacto ambiental, alternativas energéticas, redução de emissões de GEE e gestão em sustentabilidade, todas com foco em eficiência, possibilitando assim uma antecipação para provável exigência legal.

## 1.1 JUSTIFICATIVA

Desde 2008, o prestador de serviços de saneamento no Paraná realiza a quantificação e qualificação de suas emissões por meio de um Inventário de Emissões de Gases de Efeito Estufa e desde 2010 o prestador publica seus IGEE na plataforma do Programa Brasileiro GHG Protocol.

O último IGEE divulgado destaca que, ao longo dos anos, foram desenvolvidas importantes melhorias metodológicas, aumentando a exatidão dos resultados encontrados. Além disso, com o intuito de diminuir suas emissões, algumas ações já são adotadas, como a instalação de queimadores abertos em todas as ETEs dotadas de reatores anaeróbios, e a substituição do consumo de combustíveis fósseis por etanol em uma das diretorias (SANEPAR, 2017).

Apesar de ser a única companhia de saneamento do Brasil a publicar seu IGEE em uma plataforma reconhecida, a adoção de medidas para gestão das emissões de GEE ainda é muito incipiente. Há, portanto, uma grande lacuna entre a iniciativa de inventariar as emissões e implantar programas de mitigação de GEE.

Dessa forma, é necessário identificar riscos e oportunidades de melhoria e desenvolver uma política e diretrizes corporativas para gestão de emissões de gases de efeito estufa, possibilitando a redução do uso de recursos e possível geração de créditos de carbono; a melhor organização e gestão de processos produtivos e agregação de valor nas operações; a melhora na imagem da companhia e

publicidade ambiental; antecipações legais e possíveis incentivos econômicos e fiscais.

## 1.2 OBJETIVOS

### 1.2.1 Objetivo geral

Elaborar subsídios para diretrizes corporativas visando a gestão das emissões de gases de efeito estufa em um prestador de serviço de saneamento do Estado do Paraná.

### 1.2.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos do trabalho são:

- a) Elaborar um diagnóstico atual e para os próximos 20 anos da cobertura dos serviços de saneamento prestados do prestador de serviços de saneamento do Estado do Paraná.
- b) Estimar as emissões de GEE atuais e para os próximos 20 anos.
- c) Construir cenários de mitigação de emissões considerando diferentes alternativas tecnológicas.
- d) Analisar sob os aspectos ambientais (emissões) e financeiros (custo) os cenários propostos.
- e) Sugerir medidas de redução de emissões para as principais fontes de emissão.

## 2 REVISÃO DE LITERATURA

Para a construção de uma base teórica foi realizado um levantamento preliminar sobre a cobertura dos serviços de saneamento, mudanças climáticas, emissões de gases de efeito estufa durante o tratamento de efluentes, metodologias para contabilização de emissões de gases de efeito estufa, e pesquisas sobre maneiras de mitigação de gases de efeito estufa.

### 2.1 COBERTURA DOS SERVIÇOS DE SANEAMENTO NO BRASIL E NO PARANÁ

A oferta de saneamento básico é fundamental em termos de qualidade de vida, pois sua ausência acarreta poluição dos recursos hídricos, trazendo prejuízo à saúde da população, principalmente o aumento da mortalidade infantil.

Saneamento é o conjunto de medidas que visa preservar ou modificar as condições do meio ambiente com a finalidade de prevenir doenças e promover a saúde, assim como melhorar a qualidade de vida da população e a produtividade do indivíduo facilitando a atividade econômica (INSTITUTO TRATA BRASIL, 2012).

A Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental do Ministério das Cidades divulga anualmente o “Diagnóstico dos Serviços de Água e Esgotos”, com base em dados do Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento – SNIS.

Em 2015, o SNIS apurou informações sobre esgotamento sanitário, em 3.799 municípios, que corresponde a 158,9 milhões de habitantes, representando 92% da população urbana do Brasil (BRASIL, 2017a).

Com relação ao atendimento por redes de esgotos, o último levantamento do SNIS aponta que o índice médio de atendimento é de 58,0% nas áreas urbanas das cidades brasileiras, destacando-se a região Sudeste, com média de 81,9% (BRASIL, 2017a).

Quanto ao tratamento dos esgotos, observa-se que o índice médio do país chega a 42,7% para a estimativa dos esgotos gerados e 74,0% para os esgotos que são coletados. Os números mostram que o setor de saneamento no Brasil é marcado pelo déficit histórico, impactando diretamente na qualidade de vida da população (BRASIL, 2017a).

Os números da última Pesquisa Nacional de Saneamento realizada pelo IBGE são parecidos, mostrando que pouco mais da metade dos municípios brasileiros (55,16%) têm serviço de esgotamento sanitário por rede coletora em 2008, no Paraná 42,11% dos municípios são atendidos com rede coletora de esgoto. A pesquisa levantou também que apenas 28,5% dos municípios brasileiros fizeram tratamento de seu esgoto, o que impacta negativamente na qualidade dos recursos hídricos. Mesmo na Região Sudeste, onde 95,1% dos municípios possuem coleta de esgoto, menos da metade desses (48,4%) o tratam e o Estado do Paraná (41,1%) obteve a marca mais elevada da Região Sul (IBGE, 2010).

Os números referentes aos resíduos sólidos urbanos (RSU) revelam um índice de cobertura de coleta de 91,2% para o país. No tocante à disposição final dos RSU coletados, 59,1% são dispostos em aterros sanitários. O restante foi despejado em locais inadequados por 3.352 municípios brasileiros, em lixões ou aterros controlados, que não possuem o conjunto de sistemas e medidas necessários para proteção do meio ambiente contra danos e degradações, com danos diretos à saúde de milhões de pessoas (ABRELPE, 2018).

O saneamento no Brasil é um direito assegurado pela Constituição e definido pela Lei nº 11.445/2007 como o conjunto dos serviços, infraestrutura e instalações operacionais de abastecimento de água, esgotamento sanitário, limpeza urbana, drenagem urbana, manejos de resíduos sólidos e de águas pluviais (BRASIL, 2007).

A mesma lei, denominada Lei de Diretrizes Nacionais para o Saneamento Básico (LDNSB), estabelece que a União deverá elaborar o Plansab, instrumento de implementação da Política Federal de Saneamento Básico, contendo os objetivos e metas nacionais e regionalizadas, de curto, médio e longo prazos, para a universalização dos serviços de saneamento. No âmbito municipal, a LDNSB determina que todos os municípios devem formular as suas políticas públicas visando à universalização, sendo o Plano Municipal de Saneamento Básico (PMSB) o instrumento de definição de estratégias e diretrizes (BRASIL, 2007).

O PMSB deve ter participação da sociedade por meio de audiências públicas e após aprovação na câmara municipal passa a ser instrumento estratégico de planejamento de cada município, com diretrizes e metas estabelecidas para o saneamento básico (BRASIL, 2008).

Segundo levantamento do Plansab (BRASIL, 2013) o custo para universalizar o acesso aos quatro serviços do saneamento (água, esgotos, resíduos e drenagem) é de R\$ 508 bilhões, no período de 2014 a 2033. Nos últimos anos, visando diminuir o déficit no setor, o Governo Federal, por meio do Programa de Aceleração de Crescimento – PAC destinou recursos da ordem de R\$ 70 bilhões em obras ligadas ao saneamento básico. Os maiores investimentos em saneamento básico (água e esgoto), durante três anos, foram nos Estados de São Paulo, Minas Gerais, Paraná, Rio de Janeiro e Bahia, totalizando 63,3%. Entre as metas do Plansab, 93% da população brasileira deve ter seu esgoto coletado e tratado até o ano de 2033.

No Paraná, segundo a Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental (BRASIL, 2017a), os índices do setor são melhores que as médias nacionais. Com relação à rede de água, 92,83% da população paranaense é atendida com 33,67% de perdas na distribuição. Com relação ao acesso a rede coletora de esgoto 65,54% da população é atendida, sendo que 67,70% da água consumida é tratada nas estações de tratamento de efluentes no Estado.

A maior parte dos serviços de saneamento no Paraná é operada por uma única companhia de saneamento, a qual é responsável pela prestação de serviços de saneamento básico em 345 cidades em um total de 399 municípios do Paraná, e também de Porto União em Santa Catarina. Além dos serviços de fornecimento de água tratada, coleta e tratamento de esgoto, a prestadora opera aterros sanitários em Apucarana, Cornélio Procopio e Cianorte (SANEPAR, 2016).

## 2.2 MUDANÇAS CLIMÁTICAS

Modelos computacionais de simulação das mudanças climáticas sugerem que o clima do planeta poderá alterar-se significativamente neste século se as emissões dos GEEs continuarem a crescer (NOBRE, 2012).

Por outro lado, a alteração do perfil climático global, que se manifesta sob forma de tendências, rupturas e ciclicidades, faz parte da história do planeta e está documentado em relevos residuais, em depósitos sedimentares, em paleossolos, em formações vegetais relictuais, além de registros meteorológicos, disponíveis, ainda que em caráter pontual, desde o século XVII (CONTI, 2005).



De qualquer forma, nas últimas décadas, as evidências das mudanças climáticas estão mais fortes. O último Relatório de Avaliação sobre Mudanças Climáticas Globais do IPCC da ONU, publicado em 2014, apontou que as atividades antrópicas são as principais contribuintes para o aumento do aquecimento global e, conseqüentemente, para eventos climáticos extremos (IPCC, 2014).

No caso do Brasil, o Centro de Ciência do Sistema Terrestre (CCST) do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) do Brasil e o Met Office Hadley Centre (MOHC) do Reino Unido estão trabalhando em conjunto na avaliação das implicações das mudanças climáticas globais para o Brasil. O estudo além de mostrar a importância da Amazônia para o clima global e como provedora de serviços ambientais propaís, conclui que o aumento na temperatura e o decréscimo das chuvas na Amazônia acima da variação global são fatores críticos para a região (INPE e MOHC, 2011).

De qualquer maneira, parece certo que o país estará sujeito a impactos climáticos adversos. Grande parte da população do país, em função da baixa renda e do baixo nível educacional, está mais vulnerável às mudanças climáticas, e têm menores possibilidades de adaptação (NOBRE, 2012).

Levantamentos do ICLEI (2014) alertam para o fato de que, embora os esforços para reduzir a emissão de GEE possam ajudar a desacelerar o aumento da temperatura global no futuro, há a necessidade urgente de se adaptar às mudanças climáticas, pois ainda haverá o impacto das emissões históricas acumuladas. Além disso, a ocorrência de eventos extremos e suas conseqüências associadas nos últimos anos, especialmente nas cidades brasileiras, mostram a necessidade de se buscar estratégias de adaptação para o país. Assim, é necessário gerenciar os riscos e aumentar a resiliência dos sistemas natural e humano.

Um primeiro aspecto importante é a diferença entre mitigação e adaptação. No caso da mitigação, o que se pretende é reverter ou eliminar, se possível por completo, os impactos causados por determinado evento. Nesse caso, são propostas medidas ou ações que visem minimizar os impactos causados ao sistema, como, por exemplo, a redução das emissões de GEE. Para tanto, são estabelecidos prazos de implantação e execução de propostas com metas e objetivos específicos (IPCC, 2007).

No caso da adaptação, as medidas não visam propriamente a redução das causas ao sistema e sim sua capacidade de assimilação. A adaptação pressupõe

medidas imediatas que permitam conviver com os impactos causados por determinado evento. Em certa medida, os impactos também serão reduzidos porque seus efeitos deverão ser minimizados, mas o evento continuará a existir (IPCC, 2007).

Em consonância à mitigação dos efeitos das mudanças climáticas, a economia de baixo carbono busca reduzir drasticamente as emissões de GEE, ampliar a produção e o consumo de energias limpas e atingir ganhos de eficiência energética e produtiva (ANDRADE, 2017).

Apesar de haver obstáculos culturais e econômicos, é possível construir uma economia em que os impactos sobre o meio ambiente sejam menores. Andrade (2017) listou em seu artigo cinco passos para que empresas possam contribuir para uma economia de baixo carbono: (1) tecnologias limpas e energias renováveis; (2) produção circular; (3) eficiência no transporte; (4) reflorestamento e (5) valoração do carbono e dos serviços ecossistêmicos.

No Brasil, essa tendência pode ser ilustrada pela criação do Índice Carbono Eficiente (ICO<sub>2</sub>) e do Índice de Sustentabilidade Empresarial (ISE), da participação das empresas em iniciativas como *GHG Protocol* e *Carbon Disclosure Project* (CDP), bem como por meio da implementação de novas regras/normas e estabelecimento de compromisso de mitigação das emissões de GEE pelo governo brasileiro, especialmente a Política Nacional de Mudanças Climáticas (CNI, 2011).

Tanto o GHG Protocol como o CDP são plataformas para reportes das emissões de GEE, porém os dois sistemas têm por princípio propósitos diferentes. Enquanto o *GHG Protocol* busca diagnosticar a qualidade e a abrangência dos inventários de GEE, o CDP visa avaliar as estratégias estabelecidas pelas empresas para mitigação e adaptação de suas atividades perante as mudanças climáticas. Nesse sentido, as duas plataformas se complementam, pois o programa *GHG Protocol* pode fornecer subsídios para a criação de novas políticas públicas voltadas à redução de emissões nacionais de GEE e o cumprimento de metas brasileiras, já o CDP apoia investidores na tomada de decisão sobre o risco associado à atividade econômica (MISTAGE-HENRÍQUEZ e BILOTTA, 2016).

### 2.2.1 Legislação

No Brasil, com a finalidade de contribuir com a problemática global e criar condições internas para o enfrentamento de suas consequências, o governo, em suas três esferas de atuação, tem promulgado leis específicas acerca das mudanças climáticas, no âmbito federal a Lei nº 12.187, de 29 de dezembro de 2009 institui a PNMC. Essa legislação busca garantir que o desenvolvimento econômico e social contribua para a proteção do sistema climático global.

Os instrumentos para sua execução são, entre outros: o Plano Nacional sobre Mudança do Clima, o Fundo Nacional sobre Mudança do Clima e a Comunicação do Brasil à Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima. Entre outros aspectos abordados nesta legislação tem-se a previsão de incentivos econômicos para que, de fato, esta norma seja traduzida em uma economia de baixo carbono com desenvolvimento local integrado e sustentável.

No âmbito do Estado do Paraná, em 2005, criou-se o Fórum Paranaense de Mudanças Climáticas para promover discussões acerca dos problemas relacionados às mudanças climáticas e elaborar de forma participativa políticas públicas para enfrentamento do tema, o qual foi instituído pela Lei nº 16.019 de 19 de dezembro de 2008 (SEMA, 2017). Em 25 de abril de 2012, a Lei nº 17.133 instituiu a Política Estadual de Mudanças Climáticas e fixou seus princípios, objetivos, instrumentos e diretrizes (PARANÁ, 2012). Com o objetivo de estimular a redução das emissões de gases de efeito estufa, a Secretaria Estadual do Meio Ambiente do Paraná publicou a Resolução SEMA nº 9 de 19 de junho de 2017, que cria o registro público estadual de emissões de gases de efeito estufa, uma plataforma *online* de reporte de inventários de caráter voluntário, e os selos Clima Paraná, que são uma certificação para as empresas que realizam o Registro Público de suas Emissões de GEE (PARANÁ, 2016). Cada categoria corresponde ao nível de verificação dos inventários e a empresa ainda pode ganhar um ano a mais de licença de operação (SEMA, 2017). O modelo paranaense de certificação é inovador para o país em termos de política pública.

No setor de saneamento, o uso do biogás gerado em ETEs já está regulamentado em vários Estados brasileiros. Nos Estados do Rio de Janeiro e São Paulo as concessionárias de distribuição de gás são obrigadas a adicionar um percentual de biometano ao gás canalizado desde 2012 (SÃO PAULO, 2012 e RIO

DE JANEIRO, 2012). No Estado de Minas Gerais, por meio da Lei nº 20.824/2013, há isenção de ICMS no fornecimento de energia elétrica produzida em usinas geradoras de energia de fonte de biogás (MINAS GERAIS, 2013).

Em 2017, a Resolução nº 685 da Agência Nacional do Petróleo regulamenta e especifica o biometano oriundo de aterros e ETEs como combustível veicular, além de autorizar a injeção na rede de gás natural (BRASIL, 2017).

Desde 2012, é permitido o acesso a microgeração e minigeração distribuída aos sistemas de distribuição de energia elétrica nacionais, através das normas criadas pela Resolução nº 482 da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) (BRASIL, 2012). Dessa forma todo consumidor ativo tem concessão para conectar um sistema gerador de energia elétrica próprio, oriundo de fontes renováveis, as quais abrangem o biometano, às redes de distribuição das concessionárias.

A Resolução da Secretaria de Meio Ambiente nº 16 de 26 de março de 2014, em seu art. 58, já previa que o biogás gerado em reatores de digestão anaeróbia deve ser aproveitado, e na impossibilidade deve ocorrer a queima contínua para conversão de metano em CO<sub>2</sub>. Porém, recentemente o Estado do Paraná instituiu a Política Estadual do Biogás e Biometano, pela lei nº 19.500 de 21 de maio de 2018, que estabelece regras, obrigações e instrumentos de organização, incentivo, fiscalização e apoio às cadeias produtivas dos materiais derivados de decomposição de matéria orgânica. A lei também estabelece que o poder público deve fomentar a produção e o consumo de biogás e biometano, motivando por exemplo, assim como em São Paulo e Rio de Janeiro, a adição de um percentual de biometano ao gás canalizado distribuído no Estado.

Essas iniciativas, além de atender demandas do setor produtivo, aprimoram as legislações ambientais contribuindo com a redução de emissões de GEE.

## 2.2.2 Instrumentos de política ambiental

A legislação ambiental comentada é um instrumento de comando e controle para a política ambiental. Há outros instrumentos de política ambiental, os quais podem ser classificados em quatro tipos principais, embora sejam comuns também instrumentos híbridos, com características presentes em mais de uma tipologia: i) instrumentos regulatórios ou de comando e controle (C&C); ii) instrumentos

econômicos (IEs) – de mercado ou incitativos iii) instrumentos de cooperação e acordos voluntários; e iv) instrumentos de informação (LEFÈVRE, 2017).

A regulação ambiental com o uso de instrumentos de C&C busca direcionar o comportamento da sociedade e dos agentes econômicos por meio de permissões ou proibições previamente estabelecidas, baseadas em restrições legais, regulamentações ou normatizações (MOURA, 2016).

Os IEs direcionam e incentivam indiretamente comportamentos favoráveis ao meio ambiente, por meio de custos ou benefícios associados às alternativas de ação. Baseiam-se nos princípios poluidor-pagador (internalização das externalidades ambientais negativas causadas no processo produtivo), usuário-pagador (incentivo ao uso racional dos recursos naturais) ou protetor-recebedor (compensação aos que arcam com recursos privados para beneficiar o meio ambiente) (MOURA, 2016).

Os principais tipos de IEs que vêm sendo utilizados em políticas de mitigação de GEE são tributação sobre emissões, sistemas de comércio de emissões, financiamento público e privado, subsídios e doações, remoção de subsídios prejudiciais e tarifas preferenciais (LEFÈVRE, 2017).

Entre os instrumentos de cooperação e acordos voluntários estão os selos de qualidade e certificações, protocolos e acordos setoriais. No Paraná, o Selo Clima é um exemplo de incentivo para as empresas que voluntariamente reportam seus inventários de GEE na plataforma *online* da Secretaria Estadual de Meio Ambiente (SEMA).

Já os instrumentos de informação buscam orientar, influenciar ou persuadir os agentes públicos ou privados a atuarem de forma benéfica ao meio ambiente, por meio da disponibilização de informações e da disseminação de valores favoráveis ao meio ambiente (MOURA, 2016). São exemplos novas tecnologias, processos e/ou materiais, cartilhas, guias e programas de qualificação técnica.

Empresas, governos e outros atores reconhecem que o caminho para minimizar os impactos da mudança do clima está na transição para uma economia de baixo carbono. Para apoiar este processo, mecanismos de precificação de carbono vêm ganhando destaque, uma vez que visam refletir nas decisões financeiras os custos sociais, ambientais e econômicos da mudança do clima (PACTO GLOBAL ONU *et al.*, 2015).

Segundo levantamento realizado pelo Banco Mundial, cerca de 60 localidades, entre países, províncias, estados e cidades, já estabeleceram

mecanismos de precificação de carbono ou estão planejando fazê-lo (BANCO MUNDIAL, 2016).

Como reflexo da precificação mandatória do carbono cresce o número de empresas que, de forma voluntária, adotam um preço interno para o carbono, utilizando-o em sua gestão de riscos e oportunidades. Esta prática empresarial surge, geralmente, como meio de se preparar para o possível impacto do preço do carbono sobre investimentos, operações e cadeia de valor, além de fomentar a implementação de medidas de menor intensidade carbônica, por vezes com resultado financeiro positivo (GVCES, 2016).

#### 2.2.2.1 Custo Marginal de Abatimento

Um instrumento para internalizar os custos gerados pelas emissões que vem adquirindo importância crescente no cenário de uma economia de baixo carbono é a análise por meio de curvas de custo marginal de abatimento de emissões de GEE (CMA) (FIELD e FIELD, 2014).

A definição de cenários de uma economia de baixo carbono engloba a adoção de tecnologias, as quais abordam o viés ambiental e o resultado financeiro. A ferramenta custo marginal de abatimento de emissões de GEE pode auxiliar o tomador de decisão (KIMURA e SANTOS, 2016).

De forma objetiva, CMA é um instrumento analítico que procura identificar o custo da redução de determinada quantidade de GEE. São curvas de oferta que apontam o potencial de redução das emissões e o respectivo custo de cada tecnologia de redução (IPEA, 2012).

Gouvello *et al.* (2010) estimaram o custo marginal de abatimento para 40 medidas de mitigação envolvendo diversos setores da economia nacional, desde iluminação residencial e investimento em metrô à redução de desmatamento e intensificação da pecuária. O estudo analisou o potencial de mitigação e o custo marginal de abatimento de cada medida em três taxas de desconto para o período entre 2010 – 2030. Na implementação do cenário de baixo carbono, há uma previsão de redução de 80% das emissões no setor de resíduos, com investimento necessário de U\$84 bilhões para o setor entre 2010 e 2030. Para os efluentes líquidos, o estudo considerou a queima do biogás via *flares* com eficiência de 100%.



Além de elaborar, revisar e publicar as estimativas e inventários nacionais de emissões, o Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações (MCTIC) contribui tecnicamente para subsidiar as discussões sobre a elaboração da estratégia nacional para a implementação das Contribuições Nacionalmente Determinadas (NDC) do Brasil ao Acordo de Paris. A contribuição resultou no documento "Opções de Mitigação de Emissões de GEE em Setores-Chave no Brasil", que tem como objetivo apontar o papel que cada setor econômico pode desempenhar, segundo uma ótica de custo-efetividade, para o cumprimento das metas de emissões de GEE para 2025 e 2030 (MCTIC, 2017).

Para o setor de resíduos foram propostos cenários base, de baixo carbono e de baixo carbono e inovação com premissas para projeção e medidas de abatimento, no caso do tratamento de efluentes foi considerado apenas o aproveitamento do biogás em ETEs anaeróbias para produção de eletricidade. Os cenários foram analisados comparando o custo marginal de abatimento. Barreiras técnicas, de mercado, econômicas e financeiras, institucionais e culturas foram levantadas como entraves ao desenvolvimento das medidas de baixo carbono no setor (FREITAS, 2016).

#### 2.2.2.2 Compensação

Faz parte de uma análise para uma economia de baixo carbono a consideração da compensação das emissões que não puderam ser reduzidas.

O plantio de árvores e a utilização de créditos de carbono, provenientes do Mercado de Carbono Regulado ou Voluntário, são os dois principais modos de se compensar emissões. Contudo, enquanto o segundo método possui grande base e segurança técnica, o primeiro é alvo de muitas críticas por especialistas. (BITTENCOURT, 2018).

A grande maioria dos projetos de plantio de árvores destinados ao mercado de compensação de emissões de GEE não passam por monitoramento e verificações externas anuais das informações sobre as reais quantidades de CO<sub>2</sub>e que foram removidas da atmosfera. Esse fato torna possível que um mesmo crédito de carbono possa ser vendido mais de uma vez, para diversos potenciais clientes (BITTENCOURT, 2018).

Projetos implantados geram créditos de carbono, uma vez que produzem reduções de emissões de GEE adicionais àquelas que ocorreriam caso a operação da atividade fosse realizada pelos métodos tradicionais, como por exemplo, substituição de combustível fóssil por biomassa para geração de energia (BRASIL, 2008b).

Para aquisição de créditos de carbono uma empresa pode recorrer ao mercado voluntário ou ao mercado regulamentado. O mercado voluntário distingue-se do regulamentado, pois no primeiro não existe uma obrigatoriedade de redução de emissões. Essas reduções ocorrem por decisão das empresas e instituições, sem a vinculação de leis (THIESEN, 2010).

Embora o Brasil não tenha um mercado regulamentado, muitas empresas já se preocupam em reduzir e compensar suas emissões fortalecendo o mercado voluntário (GVCES, 2016).

O mercado voluntário de carbono tem dois componentes distintos: Chicago Climate Exchange (CCX), que é um regime voluntário, mas juridicamente estabelecido e; o sistema de comércio e compensação de emissões, conhecido com "mercado de balcão" (HAMILTON *et al.*, 2009).

Muitas entidades oferecem a compensação de emissões, provenientes de projetos socioambientais, como por exemplo, reaproveitamento de água e energia renovável (IPEA, 2011).

#### 2.2.2.3 Riscos e Oportunidades

Nem sempre as CMA são suficientes para a tomada de decisão para implementação da medida de mitigação. Uma análise mais profunda que envolve a identificação de riscos e oportunidades pode ser necessária (FREITAS, 2016).

Os impactos advindos da mudança do clima podem afetar o desempenho econômico, ambiental e social das organizações. As oportunidades de crescimento em produtos e serviços que resultem em baixa emissão de carbono também são significativas e devem ser identificadas e maximizadas.

Entender como os múltiplos impactos e riscos podem influenciar o ambiente de negócios é de extrema importância para a inserção corporativa na Economia de Baixo Carbono. Métodos multicritério de análise de decisão, que apoiam a

consideração de intangíveis e externalidades, são amplamente utilizados para avaliar projetos de mudança climática (Rogers *et al.*, 2010).

Mistage e Bilotta (2018), visando melhorar o processo de tomada de decisão na gestão de emissões de GEE em indústrias que incorporem custos, benefícios, oportunidades e riscos, compararam metodologias de análise de decisão com multicritérios. Os critérios foram selecionados considerando os mais importantes índices de investimento e responsabilidade social e depois foram hierarquizados.

O QUADRO 1 mostra os benefícios, oportunidades, custos e riscos identificados por Mistage e Bilotta (2018) para gestão de GEE na indústria.

QUADRO 1 – CRITÉRIOS SELECIONADOS PARA A GESTÃO DE GEE NA INDÚSTRIA

Benefícios	<p>Dimensão ambiental: redução do consumo de recursos naturais, emissões, efluentes líquidos e resíduos. Responsabilidade ambiental e compromisso com a biodiversidade.</p> <p>Governança corporativa: prestação de contas, conformidade legal, transparência e relacionamento com as partes interessadas.</p> <p>Dimensão do produto: risco e impactos devido ao uso do produto. Impactos difusos devido a uso do produto. Fornecimento de informações sobre produtos para consumidores.</p> <p>Dimensão financeira: lucro econômico e desempenho financeiro verificável. Planejamento estratégico. Contabilidade de ativos intangíveis.</p> <p>Dimensão social: relacionamento com a comunidade, fornecedores e clientes. Compromissos com princípios e direitos fundamentais nas relações de trabalho. Satisfação das demandas dos consumidores.</p>
Oportunidades	<p>Vantagem competitiva: diferenciação da concorrência através da implementação de práticas inovadoras.</p> <p>Mercado voluntário de carbono: negociação de créditos de carbono e oportunidades de financiamento através de fundos de Redução Certificada de Emissões (R\$·tCO<sub>2</sub>e<sup>-1</sup>).</p> <p>Incentivos fiscais: apoio do setor público para a implementação de projetos sustentáveis.</p>

Custos	<p>Emissões de GEE: despesas devido aos impostos atuais sobre carbono para os escopos 1 e 2 emissões diretas e emissões adquiridas ou adquiridas eletricidade, calor e resfriamento (<math>\text{R}\\$ \cdot \text{tCO}_2\text{e}^{-1}</math>). Se relevante, custo de oportunidade para não venda de créditos de carbono também pode ser incluída nesta categoria. Gestão de GEE pode reduzir custos através de melhorias de eficiência na fabricação.</p> <p>Custos financeiros: despesas esperadas devido à implementação da gestão de GEE projetos. Os custos financeiros foram classificados como despesas internas (quantidade de trabalho exigidos dos funcionários da empresa), despesas externas (para contratação de profissionais, auditores, etc.) e investimentos (custos de equipamentos implementação de novos projetos).</p>
Riscos	<p>Riscos legais: possíveis sanções (não consideradas no custo de emissões de GEE) e multas por falta de implementação de monitoramento de GEE, relatórios e sistema de verificação em conformidade com a legislação local.</p> <p>Despesas imprevistas: despesas adicionais para reparar sistemas e equipamentos.</p> <p>Bloqueio tecnológico: risco de dependência de tecnologias ultrapassadas e excessiva dificuldade para substituí-las.</p>

Fonte: MISTAGE e BILOTTA (2018).

Nessa mesma linha, o guia do CNI (2011) propõe a gestão de riscos e oportunidades que a mudança do clima representa para o setor privado, conforme QUADRO 2.

QUADRO 2 – RISCOS E OPORTUNIDADES NA ECONOMIA DE BAIXO CARBONO

Oportunidades	<p>Financeiras: Maior eficiência operacional e logística, no uso de energia e insumos produtivos. Desenvolvimento de novos mercados. Participação nos mercados internacionais de carbono. Aumento do valor das ações (melhoria da imagem da marca). Acesso a mercados financeiros internacionais.</p> <p>Regulatórias: Antecipação das regulamentações. Influência no processo de criação de novas leis. Subsídios governamentais.</p> <p>Competitivas e Reputacionais: Aumento da credibilidade da marca. Novos investidores e parceiros. Satisfação e retenção dos funcionários. Rotulagem ambiental. Melhor gestão de RH. Responsabilidade socioambiental. Ampliação de parcerias. Pioneirismo e liderança de mercado. Diferenciação da empresa e seus produtos.</p> <p>Físicas: Inovação tecnológica na produção de novos produtos e serviços para adaptação aos impactos das MC. Desenvolvimento de processo e tecnologias mais eficientes aumentando a produtividade e diminuindo a dependência por recursos naturais.</p>
Riscos	<p>Financeiros: aumento do preço das commodities (energia). Aumento nos valores de seguros. Custo do carbono (por multas). Perda de mercado. Restrição a linhas de crédito.</p> <p>Regulatórios: Estabelecimento de regulamentações mandatórias (metas de redução, taxas sobre produtos). Responsabilidade no cumprimento das legislações.</p> <p>Competitivos e Reputacionais: Perda de credibilidade da marca. Acusação de “<i>greenwashing</i>” (propaganda farsa, utilizada para mascarar um desempenho ambiental fraco e ludibriar os consumidores). Insatisfação dos empregados. Pressão e conscientização dos consumidores, investidores e dos acionistas. Imagem negativa com a mídia e com o público em geral.</p> <p>Físicos: Aumento nos preços de insumos. Alta do valor da terra. Diminuição da disponibilidade dos insumos. Danificação das estruturas.</p>

Fonte: CNI (2011).

Especificamente no setor de saneamento, Pecora (2006) identificou as vantagens, desvantagem e barreiras existentes para utilização de biogás como fonte de energia elétrica. A redução de emissões de GEE foi apresentada como impacto positivo, enquanto o risco de acidentes com explosões como impacto negativo.

A dificuldade de concorrência com as fontes fósseis dentro de um mercado liberalizado foi mencionada como barreira econômica, enquanto a falta de regulamentação como barreira financeira e política.

## 2.3 EMISSÕES DE GASES DE EFEITO ESTUFA E O TRATAMENTO DE EFLUENTES

A primeira grande conferência na área de meio ambiente foi a Conferência de Estocolmo, de 1972. Em 1992, a Rio 92 ocorreu no Rio de Janeiro, em 2002, a Rio+10 em Joanesburgo, em 2012, a Rio+20 no Rio de Janeiro, e por fim, em 2015, ocorreu em Nova York, a Cúpula de Desenvolvimento Sustentável (ONUBR, 2017). Nesse encontro, todos os países da Organização das Nações Unidas (ONU) definiram os novos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), conhecida como a Agenda 2030. Os ODS determinam ações para acabar com a pobreza, promover a prosperidade e o bem-estar para todos, proteger o meio ambiente e enfrentar as mudanças climáticas.

A mudança do clima foi reconhecida como um importante problema mundial quando em 1992, a UNFCCC foi criada na sede da ONU, em Nova York, e desde então 197 países fazem parte (UNFCCC, 2017).

A UNFCCC é considerada marco jurídico e em 1997 foi aprovado o Protocolo de Quioto, ratificado por 192 partes. Nele as nações desenvolvidas se comprometem a reduzir suas emissões de gases indutores de efeito estufa, em pelo menos 5% em relação aos níveis de 1990. Os gases considerados no escopo são: dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), metano ( $\text{CH}_4$ ), óxido nitroso ( $\text{N}_2\text{O}$ ), hexafluoreto de enxofre ( $\text{SF}_6$ ), hidrofluorcarbonos (HFCs), perfluorcarbonos (PFCs).

Em 2015, na 21ª Conferência das Partes (COP21) da UNFCCC, em Paris, os países signatários tiveram a oportunidade de adotar um novo acordo com o objetivo central de fortalecer a resposta global à ameaça da mudança do clima e de reforçar a capacidade dos países para lidar com os impactos decorrentes dessas mudanças (UNFCCC, 2017).

Por meio das Pretendidas Contribuições Nacionalmente Determinadas (iNDC, na sigla em inglês), cada nação apresentou sua contribuição de redução de emissões dos gases de efeito estufa, seguindo o que cada governo considera viável a partir do cenário social e econômico local (BRASIL, 2015b).

Desde 2009, está em vigor no Brasil, a PNMC, a qual tem como um de seus objetivos a redução das emissões de GEE e o fortalecimento das remoções por sumidouros de GEE no território nacional.

Porém apenas em 2016, por meio das suas NDC, o governo brasileiro se comprometeu em reduzir suas emissões de GEE em 37% abaixo dos níveis de 2005, até 2025, com uma contribuição indicativa subsequente de reduzir as emissões de gases de efeito estufa em 43% abaixo dos níveis de 2005, até 2030 (BRASIL, 2015b). Porém ainda não foram estabelecidos os planos e metas setoriais.

Em 2017 foi publicado o decreto 9.172 que institui o Sistema de Registro Nacional de Emissões - SIRENE como instrumento oficial para a disponibilização de resultados de emissões de gases de efeito estufa (BRASIL, 2017b).

O SIRENE será mantido com dados das estimativas previstas nas Comunicações Nacionais e Relatórios de Atualização Bienal do Brasil à Convenção do Clima, Estimativas Anuais de Emissões no âmbito da PNMC e inventários organizacionais por meio de disponibilização voluntária. O MCTIC é responsável pela implementação e pela manutenção do sistema (MCTIC, 2017).

Em paralelo aos eventos internacionais e acordos globais, a comunidade científica, por meio do IPCC tem estudado as mudanças climáticas desde 1988. Em seu Quinto Relatório de Avaliação (AR5), o IPCC aponta que o aquecimento do sistema climático é inequívoco, e desde a década de 1950, muitas das mudanças observadas não têm precedentes ao longo de décadas a milénios (IPCC, 2014).

As concentrações atmosféricas de CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> e N<sub>2</sub>O aumentaram consideravelmente nos últimos 800.000 anos (IPCC, 2013). Esse aumento histórico justifica a conclusão da base cientista que contribui para os relatórios do IPCC ao afirmar que as atividades antropogênicas são catalisadoras de alterações climáticas. O relatório do grupo de trabalho também aponta que as concentrações de dióxido de carbono aumentaram 40% desde a era pré-industrial, em primeiro lugar, a partir das emissões de combustíveis fósseis e, em segundo lugar, pelas emissões líquidas das alterações do uso dos solos (IPCC, 2013).

Nesse sentido, os gases CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> e N<sub>2</sub>O são os mais emitidos por atividades antrópicas atualmente em termos de volume: 77%, 14% e 8%, respectivamente (IPCC, 2007). Suas principais fontes globais são as atividades relacionadas à geração de energia e ao transporte - 26% e 13% do total de emissões, respectivamente, ao passo que a contribuição do setor de resíduos (que contempla o tratamento de efluentes) é de 3% (IPCC, 2007).

Sob a responsabilidade do MCTIC, a Terceira Comunicação Nacional do Brasil à Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima apresenta

que o tratamento e disposição de resíduos sólidos e efluentes contribuíram com 3,3% das emissões de GEE no Brasil em 2015. Apesar do pequeno percentual, as emissões do setor aumentaram 23% entre os anos de 2005 e 2015 (SEEG, 2016).

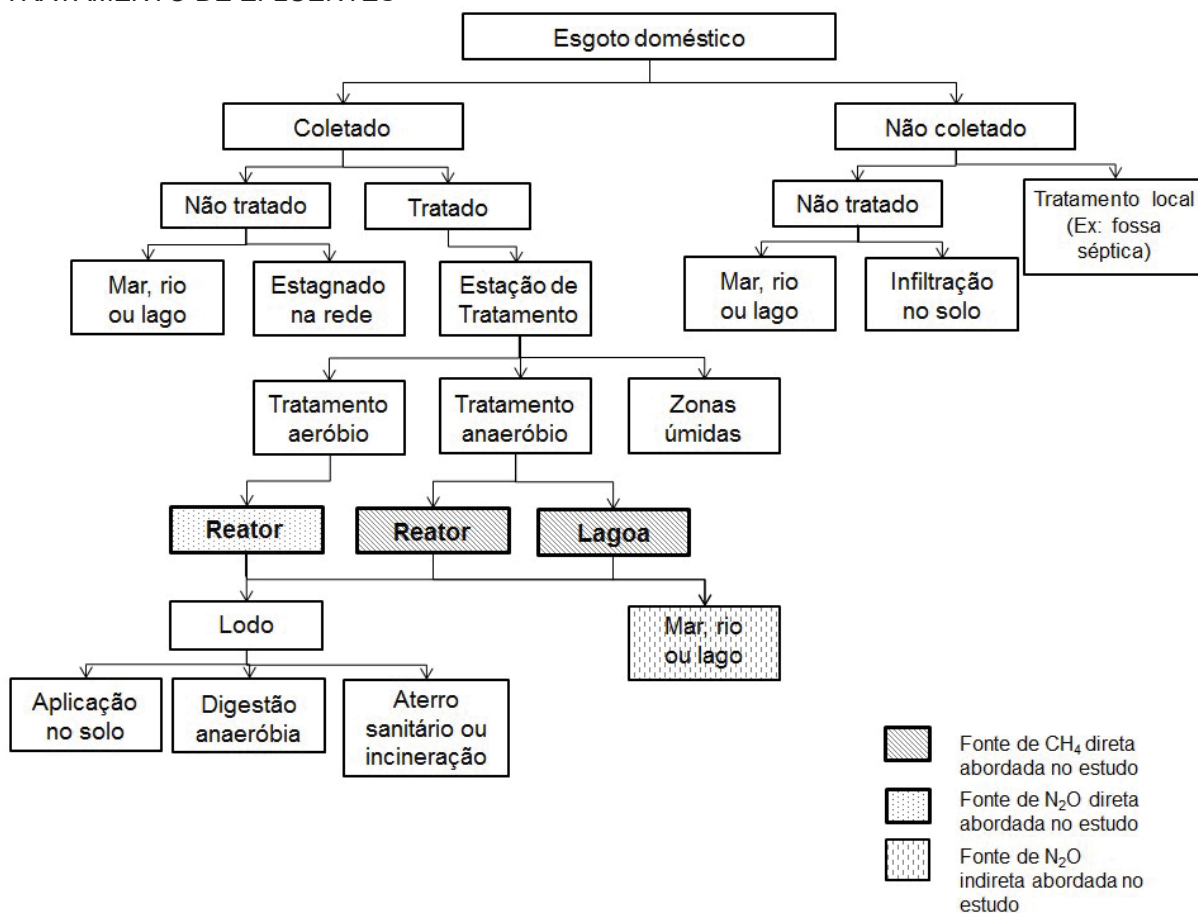
O tratamento de efluentes domésticos tem como objetivo remover os poluentes, de forma a adequar o lançamento a uma qualidade desejada ou ao padrão de qualidade vigente (VON SPERLING, 2005).

Durante o tratamento anaeróbio de efluentes domésticos, os gases  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$  e  $\text{N}_2\text{O}$  são emitidos para a atmosfera (DAELMAN et al., 2012). Segundo IPCC (2006) a produção de metano ocorre durante a decomposição anaeróbia do efluente ou do lodo. E o fator principal para determinar o potencial de geração de  $\text{CH}_4$  no tratamento de efluentes é a quantidade de matéria orgânica degradável contida no afluente. Já a produção de  $\text{N}_2\text{O}$  ocorre durante os processos de nitrificação e desnitrificação do nitrogênio presente no afluente em plantas aeróbias. As emissões de  $\text{N}_2\text{O}$  também ocorrem de forma indireta quando o efluente é lançado no corpo hídrico. A metodologia do IPCC (2006) não considera as emissões de  $\text{CO}_2$  no tratamento de efluentes.

A FIGURA 1 mostra as possíveis fontes de emissão durante o fluxo de coleta e tratamento de efluentes segundo o método do IPCC (2006). Nesse trabalho, serão abordadas apenas as emissões provenientes do esgoto coletado e tratado pelo principal prestador de serviço em estudo, as quais estão destacadas na FIGURA 1 e serão detalhadas e discutidas no Capítulo 5.



FIGURA 1 – FONTES DE EMISSÕES DE GEE DURANTE O FLUXO DE COLETA E TRATAMENTO DE EFLUENTES



FONTE: Adaptado de IPCC, 2006.

### 2.3.1 Emissões de gases de efeito estufa no tratamento biológico anaeróbio

No processo biológico anaeróbio, a remoção de matéria orgânica ocorre por meio da atividade biológica de bactérias anaeróbias (VON SPERLING, 2005). Os processos anaeróbios para tratamento de efluentes incluem sistemas com crescimento em suspensão, crescimento aderido em leito fluidizado, fluxo ascendente em manta de lodo, lagoa e muitos outros (METCALF & EDDY, 2013).

No Brasil, até a década de 70, o uso de processos anaeróbios para o tratamento de esgotos era restrito basicamente às lagoas anaeróbias, às fossas sépticas e aos digestores de lodos produzidos no tratamento da fase líquida de Estações de Tratamento de Esgoto (ETEs). No começo da década de 80, iniciavam-se no Brasil estudos para a utilização do reator anaeróbio do fluxo ascendente e manta de lodo (reator UASB, sigla do inglês) (SILVA, 2015), desenvolvido por

Lettinga na década de 80, o qual representou o avanço mais relevante na tecnologia de tratamento anaeróbio (METCALF & EDDY, 2013).

Chernicharo (2007), Von Sperling (2005) e Metcalf & Eddy (2013) mencionam diversas vantagens dos processos anaeróbios como baixo consumo energético, baixa produção de biomassa, altas cargas volumétricas e pré-tratamento eficaz. Essas vantagens aliadas às condições ambientais favoráveis dos países de clima quente, como o Brasil, onde há predominância de elevadas temperaturas durante praticamente todo o ano, têm contribuído para a colocação dos sistemas anaeróbios em posição de destaque, particularmente, os reatores UASB (LOBATO, 2011).

Entre as desvantagens do processo anaeróbio estão a necessidade de tratamento complementar e a geração de biogás, causador de odor devido ao gás sulfídrico, e de efeito estufa devido ao metano (CHERNICHARO, 2007; METCALF & EDDY, 2013; SILVA, 2015).

Com a intensificação das políticas de utilização de fontes de energia renováveis e da crescente demanda pela redução da emissão de GEE para a atmosfera, a geração de biogás em sistemas anaeróbios deixa de ser uma desvantagem.

Considerando o balanço de massa de um sistema anaeróbio, do total de matéria orgânica que entra no sistema, cerca de 50 a 80% é convertida em biogás, do qual pode ser aproveitado o potencial energético do  $\text{CH}_4$ . Apenas uma pequena parcela do material orgânico é convertida em biomassa microbiana (cerca de 5 a 15%), vindo a se constituir no lodo excedente do sistema. O material não convertido em biogás ou biomassa (10 a 30%) sai do reator como material não degradado (CHERNICHARO, 2007).

O biogás, produzido durante o tratamento de efluentes ou digestão do lodo, é constituído por uma mistura de gases como o  $\text{CH}_4$  e  $\text{CO}_2$ , seguido em menores concentrações por hidrogênio ( $\text{H}_2$ ), nitrogênio ( $\text{N}_2$ ) e gás sulfídrico ( $\text{H}_2\text{S}$ ), entre outros. Segundo Noyola et al. (2006), o biogás de reatores que tratam esgotos domésticos apresenta uma composição de  $\text{CH}_4$  (70 a 80%),  $\text{N}_2$  (10 a 25%) e  $\text{CO}_2$  (5 a 10%). Metcalf & Eddy (2013) apresentam uma composição de 56 a 70% de  $\text{CH}_4$  e 25 a 30% de  $\text{CO}_2$ . Em estudos específicos de Cabral (2016) e Possetti et al. (2013) em reatores anaeróbios, foi observado que o biogás contém de 75 a 85% de  $\text{CH}_4$ .

O metano, principal constituinte do biogás, é um gás inodoro, incolor e mais leve que o ar (densidade igual a 0,55 em relação ao ar). Quando na forma gasosa, é

inflamável apenas na faixa de concentração entre 5 e 12% no ar (NOYOLA et al., 2006). Sua molécula é tetraédrica e apolar ( $\text{CH}_4$ ), de pouca solubilidade em água. É o mais simples dos hidrocarbonetos e tem alto valor combustível.

O poder calorífico inferior do metano é  $35,9 \text{ MJ/Nm}^3$  e o do biogás com 60% de metano é  $21,5 \text{ MJ/Nm}^3$ , correspondendo a 67% do poder calorífico do gás natural ( $31,8 \text{ MJ/Nm}^3$ ) (LOBATO, 2012).

Além disso, num horizonte de 100 anos, cada tonelada de  $\text{CH}_4$  tem um potencial de aquecimento global (GWP, sigla do inglês) equivalente a 28 toneladas de  $\text{CO}_2$ , segundo o quinto relatório de avaliação do IPCC (IPCC, 2013).

Considerando o alto poder calorífico e GWP do  $\text{CH}_4$ , o interesse em aproveitamento energético do biogás tem aumentado ano após ano com o intuito de minimizar impactos ambientais e de oferecer soluções energéticas renováveis. Algumas experiências serão mencionadas no item 2.5.1.

### 2.3.2 Emissões de gases de efeito estufa no tratamento biológico aeróbio

No tratamento biológico aeróbio, o oxigênio é utilizado como receptor de elétrons e a reação é denominada aeróbia. Os principais processos aeróbios de tratamento biológicos utilizados para tratamento de esgoto segundo Metcalf & Eddy (2013) são lodo ativados, lagoas aeradas, biorreator de membranas e filtros biológicos aerados.

Nos sistemas aeróbios, do total de matéria orgânica que entra no sistema, cerca de 40 a 50% é degradada biologicamente, com a consequente conversão em dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), cerca de 30 a 40% da matéria orgânica afluenta é convertida em novas células microbianas (biomassa) e de 5 a 15% da matéria orgânica não convertida em  $\text{CO}_2$  ou biomassa deixa o sistema junto ao efluente por não ter sido degradada (CHERNICHARO, 2007). Comparando com um sistema anaeróbio, descrito anteriormente, além da maior produção de lodo, o sistema aeróbio consome mais energia, pois requer aeração. Porém a remoção de carga tende a ser mais eficiente, além de permitir a nitrificação e desnitrificação, removendo outros nutrientes como o nitrogênio (VON SPERLING, 2005).

As emissões resultantes da geração de energia dependem da fonte da eletricidade. O carvão, o petróleo, o gás natural e as fontes renováveis, por exemplo, resultarão em diferentes emissões de GEE. Para calcular as emissões resultantes

do uso de energia em uma ETE, é necessário conhecer as fontes de eletricidade fornecida à planta. Por simplicidade, costuma-se utilizar o fator de emissão nacional de geração de eletricidade (SWEETAPPLE, 2015).

As emissões oriundas do consumo de energia são consideradas indiretas pelas metodologias de IGEE.

Além da emissão oriunda do consumo de energia elétrica, nas plantas aeróbias há degradação de componentes de nitrogênio do esgoto, como uréia, nitrato e proteínas, que podem resultar na formação de  $N_2O$  (IPCC, 2006). As emissões de  $N_2O$  são resultantes da desnitrificação heterotrófica e nitrificação autotrófica (WUNDERLIN *et al.*, 2012). A nitrificação é um processo aeróbio que converte o amoníaco e outros compostos nitrogenados em nitrato ( $NO_3^-$ ). A desnitrificação ocorre em condições anóxicas e implica na conversão biológica do nitrato em nitrogênio gasoso ( $N_2$ ). O óxido nitroso é um produto intermediário de ambos os processos (METCALF & EDDY, 2013).

Kampschreur *et al.* (2009) e Massara *et al.* (2017) destacaram que o  $N_2O$  é produzido principalmente em plantas de tratamento de efluentes que possuem etapas de remoção de nutrientes como o nitrogênio. Ambos os trabalhos identificaram os parâmetros operacionais mais importantes para a geração de  $N_2O$ , entre eles, baixo oxigênio dissolvido, alto acúmulo de nitrito, baixa demanda química de oxigênio para a proporção de nitrogênio, crescimento lento de bactérias desnitrificantes, pH e temperatura descontrolados.

O guia para elaboração de IGEE do IPCC (2006) propõe um fator de emissão de  $3,2g\ N_2O \cdot hab^{-1} \cdot a^{-1}$  por planta aeróbia.

## 2.4 CONTABILIZAÇÃO DE EMISSÕES DE GASES DE EFEITO ESTUFA

Conforme levantamento, elaborado pela Comissão Europeia (2010), existem mais de 80 métodos e iniciativas relacionadas ao registro e relato de emissões de GEE no mundo.

*The Greenhouse Gas Protocol*, ou simplesmente *GHG Protocol*, é a ferramenta mais ampla e, atualmente, mais usada internacionalmente por governos e líderes empresariais para compreender, quantificar e administrar as emissões de GEE (GVCES, WRI, 2010; GREEN, 2010; SANTOS, 2015). O *GHG Protocol*,

lançado em 1998 e revisado em 2004, foi criado em parceria por duas organizações não-governamentais, o *World Resources Institute* (WRI) e o *World Business Council for Sustainable Development* e é compatível com as metodologias de quantificação do IPCC. No Brasil, sua aplicação iniciou em 2008 e acontece de modo adaptado ao contexto nacional (GVCES, WRI, 2010).

As organizações que preparam relatórios de sustentabilidade, usando orientações da *Global Reporting Initiative* (GRI), assim como as que participam de iniciativas como CDP e ISE, devem incluir informações sobre emissões de GEE, alinhadas com as normas do *GHG Protocol* e pelo padrão ISO 14064, produzido pela Organização Internacional de Padronização (GRI, 2013).

Além disso, a elaboração do Inventário Nacional de Emissões de GEE, assim como as estimativas dos estados de São Paulo, Rio de Janeiro, Minas Gerais e do Paraná, foram norteadas pelas diretrizes do IPCC (BRASIL, 2016b; CETESB, 2011; FEAM, 2005; PARANÁ, 2013 e RIO DE JANEIRO, 2017).

No setor de saneamento, em consulta aos inventários das companhias brasileiras de água e esgoto: Sabesp, Copasa e Sanepar, verifica-se que as empresas utilizam o método proposto pelo Programa Brasileiro *GHG Protocol* juntamente com o método do IPCC para a estimativa devido ao manejo de esgotos (COPASA, 2014; PAGANINI, 2013 e SANEPAR, 2017).

Sendo assim, esse trabalho segue a metodologia do IPCC (2006) e as diretrizes das Especificações do Programa Brasileiro *GHG Protocol* – EPB (2010), desenvolvidas pela FGV em parceria com WRI para o cálculo das emissões de gases de efeito estufa, as quais são descritas nos itens a seguir.

#### 2.4.1 Programa Brasileiro GHG Protocol

O Programa Brasileiro *GHG Protocol* (PBGHGP) visa instalar no país uma cultura permanente de inventários corporativos de emissões de GEE por meio da adaptação do *GHG Protocol* à realidade brasileira e da capacidade das organizações para o uso deste método no cálculo de suas emissões (GVCES, WRI, 2010).

As Especificações do PBGHGP (2010) estão em um documento guia para o setor empresarial elaborar Inventários de Gases de Efeito Estufa (IGEE). O IGEE é um diagnóstico das emissões de GEE da corporação, o qual permite conhecer o

perfil das emissões e a grandeza das mesmas, possibilitando estabelecer estratégias, planos e metas para redução e gestão das emissões de GEE (GVCES, WRI, 2010).

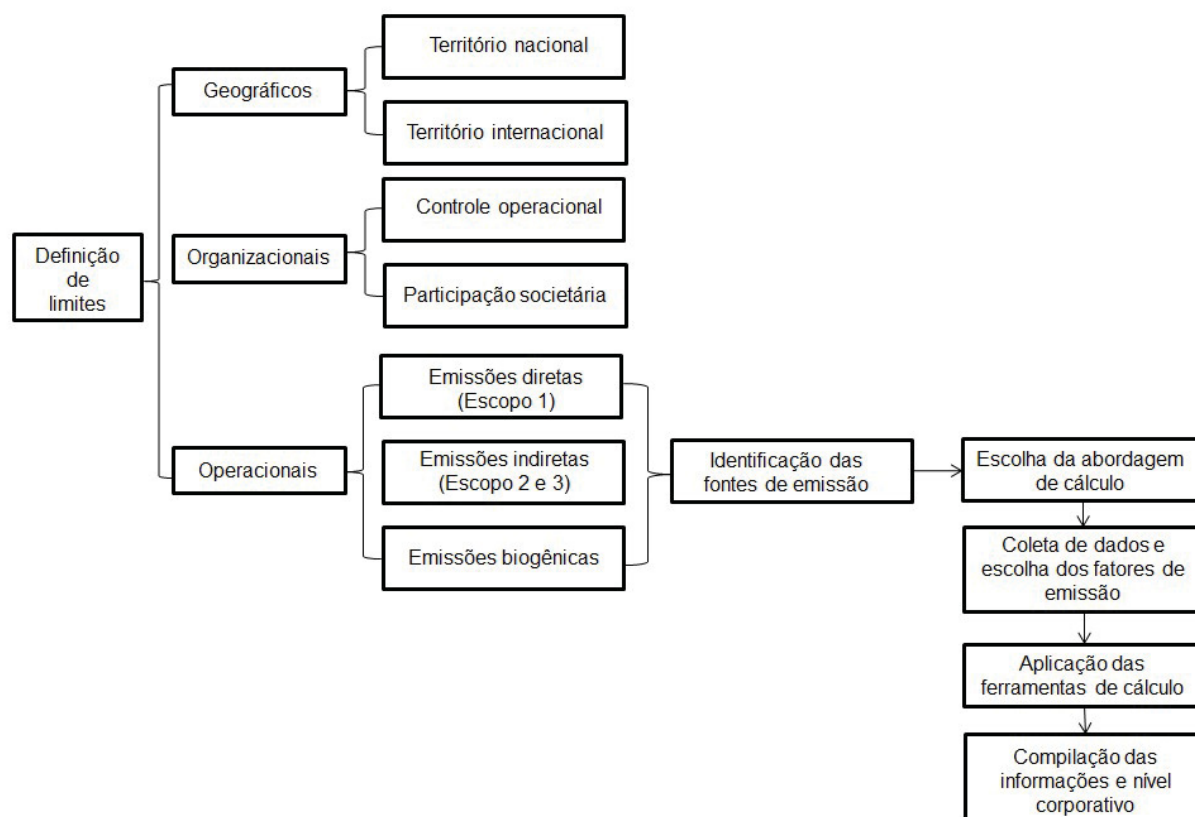
Todos os GEE regulados pelo Protocolo de Quioto, já mencionados anteriormente, devem ser incluídos no IGEE.

A contabilização, quantificação, elaboração e publicação de inventário de GEE no âmbito do PBGHGP deve estar em conformidade com os cinco princípios de contabilização de GEE apresentados no *GHG Protocol Corporate Standard* e na norma ISO14064-1 (ABNT, 2015). São eles:

- Relevância: busca assegurar que o inventário reflita, com exatidão, as emissões da empresa e que sirva às necessidades de decisão dos utilizadores – tanto no nível interno como no externo à empresa.
- Integralidade: todas as fontes de emissões dentro do limite de inventário escolhido precisam ser contabilizadas para que o inventário compilado seja abrangente e significativo. Na prática, a falta de dados ou o custo de compilá-los pode ser um fator limitante.
- Consistência: dentro do limite de inventário de uma organização devem ser compiladas de forma a garantir que as informações agregadas sejam internamente consistentes e comparáveis ao longo do tempo.
- Transparência: as informações devem ser registradas, compiladas e analisadas de forma a possibilitar que revisores internos e auditores externos atestem sua credibilidade.
- Exatidão: os dados devem ser suficientemente precisos para permitir que os usuários tomem decisões com confiança razoável de que as informações relatadas têm credibilidade.

O método do PBGHGP constitui-se de alguns passos para sua aplicação, elucidados no fluxograma da FIGURA 2.

FIGURA 2 – FLUXOGRAMA DO MÉTODO PBGHGP



FONTE: Elaboração do autor.

Primeiramente devem ser definidos os limites geográficos, organizacionais e operacionais. Nos limites geográficos devem ser incluídas todas as fontes de emissões localizadas em território brasileiro. As emissões internacionais poderão ser relatadas adicionalmente às emissões nacionais de maneira opcional e separada (GVCES, WRI, 2010).

Para a definição dos limites organizacionais existem duas possibilidades de análise: a abordagem de controle operacional, situação na qual a empresa possui autoridade para introduzir políticas na operação em questão, e a abordagem de participação societária (GVCES, WRI, 2010).

Já a definição dos limites operacionais envolve a identificação das emissões associadas com as suas operações, classificando-as como emissões diretas ou indiretas e/ou biogênicas, e selecionando o escopo para contabilização e elaboração do inventário de emissões, conforme descrito no QUADRO 3.



QUADRO 3 – CRITÉRIOS DE DEFINIÇÃO DE LIMITES OPERACIONAIS

Fonte / Escopo	Descrição
Direta / Escopo 1	São emissões provenientes de fontes que pertencem ou são controladas pela organização. Devem ser subdivididas em cinco categorias: combustão estacionária para geração de eletricidade, combustão móvel para transportes, emissões de processos físicos e químicos, emissões fugitivas e emissões agrícolas.
Indireta / Escopo 2	São emissões provenientes da aquisição de energia elétrica, térmica ou vapor.
Indireta / Escopo 3	São emissões resultantes das atividades da organização que está inventariando suas emissões, mas que ocorrem em fontes que pertencem ou são controladas por outra organização. A contabilização do escopo 3 é de caráter opcional.
Biogênicas / Sem escopo	Emissões resultantes da combustão de biomassa devem ser tratadas de forma diferente daquelas provenientes de combustíveis fósseis. O CO <sub>2</sub> liberado na combustão de biomassa é igual ao CO <sub>2</sub> retirado da atmosfera durante o processo de fotossíntese e, dessa forma, é possível considerá-la “carbono neutro”. As emissões de CO <sub>2</sub> advindas da combustão da biomassa devem ser excluídas dos Escopos 1, 2 e 3 e serem reportadas separadamente.

FONTE: Adaptado da ferramenta *GHG Protocol*, 2017.

A partir da definição dos limites operacionais é possível identificar as fontes de emissões diretas e indiretas em cada uma das categorias de fontes listadas no QUADRO 3. Posteriormente é necessária a escolha da abordagem de cálculo. Como a mensuração direta das emissões de GEE através de monitoramento tende a ter um custo elevado, a tendência é estimar as emissões com base em um balanço de massa, por estequiometria ou por meio da aplicação de fatores de emissão padronizados e/ou documentados (GVCES, WRI, 2010).

A coleta de dados e escolha dos fatores de emissão constitui-se em uma das etapas mais críticas para o sucesso e a qualidade do inventário. Determinados elementos podem contribuir para uma adequada condução do processo, como um sistema de informações bem estruturado e a participação de gestores de diversas áreas da empresa participante. Quanto aos fatores de emissão, as orientações do IPCC (2006) referem-se a uma hierarquia de abordagens de cálculo e técnicas, desde a aplicação de fatores de emissão genéricos até o monitoramento direto.

Com a posse dos dados e dos fatores de emissão, os valores podem ser aplicados nas ferramentas de cálculo. Existem dois tipos de ferramentas a serem aplicadas: intersetoriais e as setoriais específicas. No primeiro caso, as informações podem ser aplicadas a qualquer tipo de organização e o segundo direciona-se a setores determinados (GVCES, WRI, 2010).



Para auxiliar no cumprimento dos objetivos do PBGHGP, a FGV e o WRI desenvolveram a “Ferramenta de estimativa de gases de efeito estufa para fontes intersetoriais” (Ferramenta GHG Protocol). A ferramenta, uma planilha do *software* Excel®, encontra-se atualmente na versão “Ferramenta v2017\_v4” disponível no site do PBGHGP (GHG Protocol, 2017).

Dentre as categorias estabelecidas pela ferramenta, serão abordadas nesse estudo apenas as que o prestador de serviço em estudo identificou no seu IGEE 2016. São elas: combustão estacionária, combustão móvel, emissões fugitivas do Escopo 1 e compra de energia elétrica do Escopo 2. As emissões biogênicas são geradas nas categorias de combustão estacionária e móvel da ferramenta.

- Combustão estacionária

Para calcular emissões diretas do escopo 1 provenientes da queima de combustíveis fósseis de equipamentos estacionários, a Ferramenta GHG Protocol se baseia na metodologia IPCC 2006, contida no Volume 2 “*Energy*” – *Chapter 2 “Stationary Combustion”*. Os fatores de emissão da queima de combustíveis são extraídos do Balanço Energético Nacional ano base 2016 (MCTIC, 2016).

O usuário preenche o consumo mensal de combustível pela companhia, ou unidade por tipologia e a ferramenta multiplica pelo fator de emissão do combustível e pelo percentual de biocombustíveis nos combustíveis fósseis.

O Brasil adota o uso de biocombustíveis incorporados a alguns combustíveis fósseis. Essa adição ocorre da seguinte forma: i) o etanol anidro é adicionado à gasolina comum e ii) o biodiesel é adicionado ao óleo diesel. O teor de adição de biocombustíveis é definido pela Agência Nacional do Petróleo e muda de acordo com a disponibilidade dos dois tipos de combustível (GVCES, WRI, 2010).

- Combustão móvel

Para as emissões provenientes da queima de combustíveis fósseis da frota veicular, a Ferramenta GHG Protocol também se baseia na metodologia IPCC 2006, contida no Volume 2 “*Energy*” – *Chapter 3 “Mobile Combustion”*. Os fatores de emissão da queima de combustíveis são os mesmos e o cálculo também depende do preenchimento do consumo mensal de combustível, que é multiplicado pelo fator de emissão do combustível e pelo percentual de biocombustíveis nos combustíveis fósseis.

- Emissões fugitivas

Para as emissões fugitivas provenientes de equipamentos de refrigeração e ar condicionado (RAC) e de extintores de incêndio, a Ferramenta GHG Protocol apresenta três opções de cálculo, de acordo com a precisão dos dados de entrada, para estimativa das emissões provenientes a instalação, operação, manutenção e disposição final dos equipamentos.

A abordagem por “Estágio do Ciclo de Vida” é adequada para usuários que contratam os serviços de manutenção dos sistemas de refrigeração ou de extintores de incêndio. Requer dados de quantidade de GEE utilizado para carregar novos equipamentos durante a instalação, para a manutenção do equipamento e a quantidade de GEE recuperada durante o descarte final, além da carga total dos equipamentos novos e descartados.

A abordagem por “Balanço de Massa” é indicada para usuários que mantêm seu próprio equipamento, é baseada na quantidade de gás comprado e utilizado.

Existe uma terceira opção de "Triagem" que serve exclusivamente para se estabelecer a relevância das emissões de RAC nas emissões totais da organização (>5% do total). Nesse caso, a estimativa é baseada em fatores de emissão e taxas de vazamento padrão dos equipamentos, os quais são extremamente conservadores. Por isso, esse método só deve ser usado na ausência de dados para aplicação das duas primeiras opções.

Em qualquer uma das abordagens, o valor obtido para as emissões de cada GEE deve ser multiplicado pelo valor correspondente ao seu Potencial de Aquecimento Global (GWP) em relação ao CO<sub>2</sub>.

- Energia elétrica

Para calcular as emissões indiretas do escopo 2 provenientes do consumo de energia elétrica, a Ferramenta GHG Protocol multiplica o consumo mensal de energia preenchida pelo usuário pelo fator de emissão do Sistema Interligado Nacional (SIN).

Os fatores mensais de emissão do SIN de distribuição de eletricidade são divulgados anualmente pelo MCTIC. Baseados na matriz energética brasileira, os fatores de emissão ficam sujeitos pela variação sazonal de acordo com a disponibilidade hídrica dos reservatórios.

A ferramenta permite a partir do preenchimento dos dados de entrada, obter na aba resumo a estimativa de suas emissões em termos de CO<sub>2</sub>e. Na versão atual da ferramenta, e neste estudo, são utilizados GWP do IPCC *Fourth Assessment Report: Climate Change 2007 - AR4*, apresentados na TABELA 1, conforme orientação do PBGHGP.

TABELA 1 – POTENCIAL DE AQUECIMENTO GLOBAL (GWP)

Gás	Família	GWP
CO <sub>2</sub>	-	1
CH <sub>4</sub>	-	25
N <sub>2</sub> O	-	298
HFC32	HFC	675
HFC125	HFC	3.500
HFC134a	HFC	1.430
R410a	Composto	2.088

FONTE: Adaptado de IPCC, 2007.

#### 2.4.2 Guia do Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas para Inventários Nacionais de Gases de Efeito Estufa

Para calcular as emissões de processo de tratamento de efluentes e disposição de resíduos sólidos, as diretrizes do IPCC de 2006 para os Inventários Nacionais de Gases de Efeito Estufa dividida em 5 volumes podem ser utilizada. O volume 1 descreve os passos básicos para elaboração de IGEE. Os demais volumes oferecem orientações para estimativas em diferentes setores da economia. O volume 2 contém diretrizes do setor de energia, o volume 3 de processos industriais e uso de produtos, o volume 4 da agricultura, silvicultura e outros usos da terra, e finalmente o volume 5 do setor de resíduos, foco desse item (IPCC, 2006).

Há uma hierarquia de abordagens de cálculo e técnicas, se a empresa tem monitoramento direto e o país dispõe de um método específico, a abordagem é classificada como nível 3, *bottom-up* ou seja, os dados utilizados são de baixo para cima. Se a empresa não tem medição, mas o país possui fatores de emissão para as vias principais, a abordagem é considerada nível 2. Porém, se o país não possuir fatores de emissão próprios, caso do Brasil para o setor de saneamento, deve-se usar os fatores padrões, sendo classificada como uma abordagem de nível 1, *top-down*, de cima para baixo (IPCC, 2006).

Para estimativa das emissões de GEE oriundas do tratamento de efluentes é utilizado o Capítulo 6 do volume 5. Segundo esse capítulo, um prestador de serviços de saneamento pode apenas declarar as emissões que estão sob sua responsabilidade, portanto, considera-se apenas a parcela de esgoto que é coletado através da rede coletora e encaminhado para uma planta centralizada. Segundo o método, não se acredita que o efluente estagnado na rede coletora seja uma fonte significativa de  $\text{CH}_4$  (IPCC, 2006).

Considerando a Tabela 6.1 do guia do IPCC (2006), no caso do esgoto coletado e tratado, tem-se: i) plantas com tratamento aeróbio são fontes pequenas de  $\text{N}_2\text{O}$  quando estão com sobrecarga ou não são bem operadas podem produzir  $\text{CH}_4$ ; ii) tratamento anaeróbio de lodo de esgoto de plantas com tratamento aeróbio é uma fonte significativa de  $\text{CH}_4$ , quando o gás não é queimado ou recuperado; iii) lagoas rasas aeróbias produzem  $\text{CH}_4$ , se mal concebidas ou mal geridas; iv) lagoas ou reatores com tratamento anaeróbio produzem  $\text{CH}_4$ , quando o gás não é queimado ou recuperado; v) o descarte de efluente tratado de plantas anaeróbias produz  $\text{N}_2\text{O}$ .

Assim como no PBGHGP, o IPCC considera que as emissões de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) não precisam ser reportadas.

#### 2.4.2.1 Emissões de Metano ( $\text{CH}_4$ ) em ETEs

Segundo o método IPCC (2006), os passos para a elaboração do inventário de  $\text{CH}_4$  de efluentes são: i) usar a equação 6.3 para estimar o conteúdo de carbono orgânico total degradável em efluentes; ii) eleger as vias ou sistemas da Figura 1 que serão abordados. E usar a equação 6.2 para obter o fator de emissão para cada via ou sistema de tratamento; iii) usar a equação 6.1 para estimar as emissões, fazer aos ajustes necessários de acordo com a destinação do lodo e recuperação do  $\text{CH}_4$  e somar os resultados para cada via ou sistema.

A estimativa de emissão de  $\text{CH}_4$  oriunda do tratamento anaeróbio de efluentes domésticos é definida pela equação (1) que corresponde às equações 6.1, 6.2 e 6.3 do IPCC (2006):

$$Emissão\ CH_4 = \left\{ \left[ \sum_{i,j} (U_i \cdot T_{i,j} \cdot B_o \cdot MCF_j \cdot \eta_j) \right] \cdot [(P_j \cdot DBO \cdot 365 \cdot 0,001 \cdot I) - S] \right\} - R \quad (1)$$

onde:

Emissão CH<sub>4</sub> = [kg·a<sup>-1</sup>]

i = classe social;

j = cada sistema de tratamento;

U<sub>i</sub> = fração da população na classe social i no ano de inventário [número de habitantes na classe social i/total de habitantes na área urbana];

T<sub>i,j</sub> = grau de utilização do sistema de tratamento j, para cada classe social i no ano de inventário [%];

B<sub>0</sub> = máxima capacidade de produção de metano por DBO [kg·kg<sup>-1</sup>];

MCF<sub>j</sub> = fator de correção do metano [adimensional];

η<sub>j</sub> = eficiência composta por todas as etapas do sistema de tratamento j no ano de inventário [%];

P<sub>j</sub> = população atendida pelo sistema de tratamento j [número de habitantes];

DBO = DBO per capita [g·hab<sup>-1</sup>·d<sup>-1</sup>];

I = fator de correção pelo descarte adicional de esgoto industrial na rede de esgoto [adimensional];

S = componente orgânico removido no lodo em DBO no ano de inventário [kg·a<sup>-1</sup>];

R = quantidade de CH<sub>4</sub> recuperado pelo sistema de tratamento no ano de inventário [kg·a<sup>-1</sup>].

Os fatores padrões, para uma abordagem de nível 1, são encontrados nos quadros 6.2, 6.3, 6.4 e 6.5 do Capítulo 6 do guia do IPCC (2006).

#### 2.4.2.2 Emissões de Óxido Nitroso (N<sub>2</sub>O) em ETEs

As emissões de N<sub>2</sub>O podem ser produzidas diretamente nas estações de tratamento de esgoto ou indiretamente quando do lançamento do esgoto doméstico tratado em cursos d'água, lagos ou mar. Em sistemas anaeróbios as emissões diretas do tratamento são muito menores que as indiretas, então a metodologia orienta estimar as emissões diretas apenas para plantas avançadas de tratamento, como sistemas aeróbios.

A estimativa de emissão indireta de  $N_2O$  por tratamento anaeróbio de efluentes domésticos corresponde às equações 6.7 e 6.8 do IPCC (2006) e é mostrada pela equação (2) a seguir:

$$Emissão\ N_2O\ indireta = [(P_{trat} \cdot P_{prot} \cdot F_{NPR} \cdot F_{non} \cdot F_{\frac{ind}{com}}) - N_{lodo}] \cdot EF_{efluente} \cdot \frac{44}{28} \quad (2)$$

onde:

Emissão de  $N_2O$  =  $[kg \cdot a^{-1}]$ ;

$P_{trat}$  = população atendida pelo sistema de tratamento [número de pessoas];

$P_{prot}$  = consumo per capita anual de proteína para o Brasil  $[kg_{prot} \cdot hab^{-1} \cdot d^{-1}]$ ;

$F_{NPR}$  = fração de N presente na proteína  $[kg \cdot kg_{prot}^{-1}]$ ;

$F_{non}$  = fator de ajuste para proteína não consumida [adimensional];

$F_{ind/com}$  = fator de ajuste para contribuição de efluente industrial e comercial [adimensional];

$N_{lodo}$  = quantidade de nitrogênio removido no lodo  $[kg \cdot a^{-1}]$ ;

$EF_{efluente}$  = fator de emissão de  $N_2O$  para as emissões indiretas provenientes de plantas anaeróbias  $[kg_{N_2O} \cdot kg_N^{-1}]$ .

A estimativa de emissão direta de  $N_2O$  por tratamento aeróbio de efluentes domésticos corresponde a equações 6.9 do IPCC (2006) e é mostrada pela equação (3) a seguir:

$$Emissão\ N_2O\ direta = P_{trat} \cdot T_{planta} \cdot F_{\frac{ind}{com}} \cdot EF_{planta} \quad (3)$$

onde:

Emissão de  $N_2O$  =  $[kg \cdot a^{-1}]$ ;

$P_{trat}$  = população atendida pelo sistema de tratamento [número de pessoas];

$T_{planta}$  = grau de utilização da planta [%];

$F_{ind/com}$  = fator de ajuste para contribuição de efluente industrial e comercial [adimensional];

$EF_{planta}$  = fator de emissão para as emissões diretas provenientes de plantas aeróbias  $[kg \cdot hab^{-1} \cdot d^{-1}]$ .

### 2.4.2.3 Emissões de Metano (CH<sub>4</sub>) em Aterros Sanitários

O método para estimativa das emissões de metano oriundas da atividade de disposição final dos resíduos sólidos urbanos é descrita no capítulo 3 do volume 5 do guia IPCC (2006), a qual estima a emissão de metano por decaimento de primeira ordem (FOD, sigla do inglês). O IPCC disponibiliza a ferramenta IPCC Waste Model.

O modelo FOD é construído com um fator exponencial que descreve a fração de material degradável anualmente. A geração de CH<sub>4</sub> dos resíduos dispostos diminui gradualmente ao longo dos anos seguintes.

Uma chave de entrada do modelo é a quantidade de matéria orgânica degradável dos resíduos dispostos em aterros. A estimativa é baseada em informações da composição dos resíduos em termos de categoria (doméstico, industrial, lodo, etc.) e tipologia (alimentos, papel, plástico, madeira, etc.). Informações sobre a região do aterro, como clima e solo, também devem ser inseridas no modelo.

A base para o cálculo é a quantidade decomposta de carbono orgânico degradável, descrita pela equação (4):

$$DDOC_m = W \cdot DOC \cdot DOC_f \cdot MCF \quad (4)$$

onde:

$DDOC_m$  = é a parte do carbono orgânico que irá degradar sob as condições anaeróbicas em aterros e m é o índice usado para massa [kg];

W = quantidade de resíduos [kg];

DOC = fração de carbono orgânico degradável nos resíduos [%];

$DOC_f$  = fração do carbono orgânico degradável que se decompõe em condições anaeróbicas [%];

MCF = fator de correção de metano, que corresponde à parte de resíduos que se decompõe em condições anaeróbicas em aterros [adimensional].

## 2.5 MEDIDAS DE MITIGAÇÃO DE GASES DE EFEITO ESTUFA NO TRATAMENTO DE EFLUENTES

Por meio do balanço de DQO de sistemas anaeróbios mencionado anteriormente, observa-se que os principais subprodutos do processo são lodo e biogás (LOBATO, 2011).

Em países mais desenvolvidos, práticas como aterramento de lodos residuais, queima de biogás em flares e desperdício de subprodutos que poderiam ser reutilizados não são mais uma realidade (EPA, 2011). O desperdício desses subprodutos não é apenas uma prática pouco sustentável, como também representa uma perda de possíveis receitas.

Com a aprovação da Lei nº 12.305/2010, o lodo de processos de tratamento de esgoto precisa ser submetido a todos os processos possíveis de tratamento e recuperação por meio de tecnologias economicamente viáveis, antes de serem depositados num aterro sanitário (BRASIL, 2010).

Dessa maneira, em consonância com os conceitos de produção mais limpa, com eficiência ambiental e energética, o uso energético do biogás para secagem e higienização do lodo ou para produção de energia elétrica está alinhado com a promoção de uma economia de baixo carbono.

A recuperação do biogás gerado a partir da digestão anaeróbia pode oferecer importantes benefícios ambientais, econômicos, energéticos e sociais. O maior benefício é certamente o ambiental – climático, uma vez que se pode atuar na redução de emissões significativas de metano (POSSETTI *et al.*, 2015). Do ponto de vista dos benefícios econômicos e energéticos, destaca-se o fato de que o metano produzido em aterros sanitários e estações de tratamento de efluentes industriais e esgoto doméstico é um recurso energético local e renovável, gerado continuamente e podendo se constituir em uma fonte de combustível para diversas aplicações (USEPA, 2005).

A escolha da tecnologia para o tratamento de efluentes também pode ser uma oportunidade de redução de GEE. Um estudo de Noyola *et al.* (2016) analisou a atual infraestrutura de tratamento de efluentes do México e por meio de uma análise de cenários mostrou que as reduções de GEE podem chegar em até 34% quando comparada com o cenário base dependendo da tecnologia de tratamento. Os



resultados do cenário composto por plantas com etapas anaeróbias e aeróbias são mais promissores do que os do cenário totalmente aeróbio.

No estudo de Kampschreur et al. (2009) os parâmetros operacionais identificados mais significativos para tentar reduzir as emissões de  $N_2O$  das plantas aeróbias foram: assegurar uma concentração de oxigênio dissolvido suficientemente alta durante o estágio de nitrificação; reduzindo as concentrações de nitrito durante a nitrificação e a desnitrificação; e mantendo uma relação DQO/N adequadamente elevada durante a desnitrificação. No entanto, não foram derivadas relações quantitativas entre as variáveis do processo e as emissões de  $N_2O$ .

Salinas e Bustos (2012) analisaram a causa e efeito de medidas de mitigação de GEE e impactos positivos que a sua implementação geraria no México e puderam verificar que plantas aeróbias bem operadas podem reduzir até 75% das emissões de GEE.

### 2.5.1 Aproveitamento energético do biogás

O biogás é uma mistura de gases resultantes do processo anaeróbio de degradação da matéria orgânica, o principal componente dessa mistura é o metano, um gás com alto potencial energético, que faz do biogás uma fonte renovável de energia. O biometano por sua vez, é resultado do processo de purificação do biogás até características similares ao do gás natural (GN) (ABIOGÁS, 2018).

Segundo a Associação Brasileira de Biogás e Biometano o potencial brasileiro de produção de biogás no setor sucroenergético é de 39 bilhões  $m^3 \cdot a^{-1}$ , no setor de alimentos é de 9 bilhões  $m^3 \cdot a^{-1}$  e 4 bilhões  $m^3 \cdot a^{-1}$  no setor de saneamento. Enquanto a demanda de energia elétrica do país é de 473.395 GWh e a de combustível é 60 bilhões de litros de óleo diesel, a produção de biogás e biometano poderia suprir essas demandas em 24 e 44% respectivamente (ABIOGÁS, 2018).

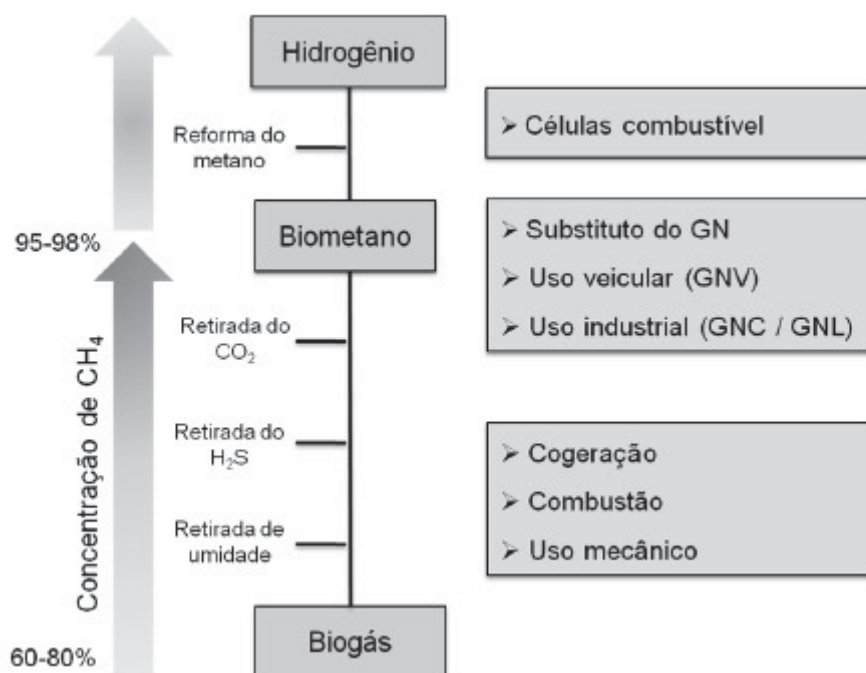
Outros fins para o biogás foram apontados por Lobato (2011), tais como:

- i) uso direto como combustível em caldeiras, fornos e estufas em substituição aos outros tipos de combustíveis;
- ii) geração de eletricidade para uso local ou venda para a rede da concessionária de energia;
- iii) cogeração de eletricidade e calor;

- iv) combustível alternativo visando à injeção na linha de gás natural ou o aproveitamento como combustível veicular.

Valente (2015) levantou os aproveitamentos possíveis de biogás oriundo de ETEs, ilustrados na FIGURA 3, a seguir.

FIGURA 3 – POTENCIAL DE APROVEITAMENTO DE BIOGÁS EM UMA ETE ANAERÓBIA



Fonte: VALENTE, 2015.

Legenda: GN: Gás natural, GNV: Gás natural veicular, GNC: Gás natural comprimido e GNL: Gás natural liquefeito.

As formas de aproveitamento do biogás vão depender das características do combustível, como as faixas de concentração das substâncias que o compõe. Para sua utilização, é necessário projetar tecnologias que tratem o biogás até o nível exigido pelo tipo de aproveitamento (VALENTE, 2015).

O biogás, depois da remoção das principais impurezas como umidade e gás sulfídrico (H<sub>2</sub>S) pode ser utilizado para a produção de energia elétrica e energia térmica. Já o biometano é o resultado de uma purificação muito mais exigente (FIGURA 3) e pode ser utilizado como substituto do gás natural veicular (GNV), sendo necessária, ainda, uma compressão e posterior armazenamento (BRASIL, 2015a).

Como não existem normas ou manuais brasileiros sobre o tratamento, armazenamento e aproveitamento energético de biogás, Valente (2015) recorreu a ficha informativa da Associação Alemã DWA-M 361 (DWA, 2011), e em geral, pode-se afirmar que, qualquer que seja a forma de utilização, é necessário dar especial atenção à remoção da umidade, remoção de  $\text{H}_2\text{S}$  e, em alguns casos, à eliminação dos siloxanos.

Sendo assim, tanto para a implementação de motogeradores como queimadores, são necessários um conjunto de acessórios adicionais, como: gasômetro, tanques de drenagem, dessulfurizador, filtro de carvão, válvulas cortachamas, medidor de vazão, analisador de gases e compressores (CARVALHO, 2016).

O potencial de aproveitamento energético do biogás já está bem fundamentado pela literatura. Pecora (2006) relatou a experiência com a captação do biogás proveniente do tratamento do esgoto do Conjunto Residencial da Universidade de São Paulo, sua purificação e armazenamento, para posterior geração de energia elétrica, utilizando como tecnologia de conversão energética um motor ciclo Otto.

Como o volume de biogás produzido ( $4 \text{ m}^3\text{d}^{-1}$ ) foi insuficiente para que o grupo gerador de 18 kW funcionasse continuamente, sem paradas, houve necessidade de armazenamento do biogás, antes de ser queimado no motor. Para que a produção de biogás fosse regular ao longo de 24 horas, a ETE deveria atender, no mínimo, uma população de 10.000 habitantes, sendo assim seria capaz de gerar de  $5,544 \text{ MWh}\cdot\text{mês}^{-1}$  (PECORA, 2006).

Silveira *et al.* (2018) dimensionaram um reator UASB para tratamento de efluentes domésticos e recuperação do biogás para produção energética em Pouso Alegre/MG. Com a proposta de 6 reatores trabalhando com uma vazão média de projeto de  $0,33 \text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ , os autores estimaram uma produção de  $4,055 \text{ m}^3\cdot\text{d}^{-1}$  de biogás, fato que permite produzir  $160 \text{ MWh}\cdot\text{mês}^{-1}$  de energia.

Schwartz *et al.* (2011) avaliaram o potencial de aproveitamento energético da ETE Atuba Sul em Curitiba e foi possível verificar que o volume de biogás gerado pela ETE é compatível com a energia máxima requerida pela planta ( $136,8 \text{ MWh}\cdot\text{mês}^{-1}$ ).

Considerando a capacidade dos reatores anaeróbios e comparando esses estudos, acredita-se que a produção de energia calculada no estudo de Silveira *et. al.* esteja superestimada.

Lobato (2011) realizou uma comparação entre as principais alternativas de recuperação de energia do biogás produzido em reatores UASB, com ênfase na cogeração de energia elétrica e térmica e na secagem térmica e higienização do lodo. Em seu estudo, conclui-se que para reatores UASB com baixa capacidade de produção e recuperação de metano, a principal alternativa de aproveitamento energético refere-se à combustão direta com recuperação de energia térmica. Já em reatores UASB com alta capacidade de produção e recuperação de metano, a cogeração de eletricidade e calor encontra viabilidade.

Santos (2017) analisou a viabilidade econômica de aproveitamento energético do biogás produzido na ETE Santana de Varginha em Minas Gerais com capacidade instalada de  $0,18 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  e tratamento composto por reator anaeróbio seguido de filtro biológico percolador e decantador secundário. A produção de biogás foi estimada em  $1.850 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ , o potencial teórico de geração de energia elétrica foi calculado em  $79,365 \text{ MWh} \cdot \text{mês}^{-1}$ , descontando a energia elétrica consumida para o funcionamento da própria ETE, obteve um excedente teórico de produção de  $35,965 \text{ MWh} \cdot \text{mês}^{-1}$ , que lançado na rede de distribuição, pode gerar uma receita mensal pela compensação de energia estimada em R\$ 27.330,40.

Miki (2018) em seu trabalho sobre o uso do biometano como combustível veicular levantou no Brasil quatro iniciativas:

- Projeto de produção de biometano em uma Cooperativa dos Citricultores Ecológicos do Vale do Caí (Ecocitrus), em Montenegro, no Rio Grande do Sul.
- Projetos apoiados pela Itaipu Binacional, Parque Tecnológico Itaipu (PTI) e Centro Internacional de Energias Renováveis-Biogás (CIBiogás), no Paraná, com destaque para produção de biometano a partir de restos orgânicos e poda de grama para uso em frota própria.
- Experiência do Aterro Dois Arcos, em São Pedro da Aldeia no Rio de Janeiro, com produção de biometano para uso veicular.
- Projeto de beneficiamento de biogás para produção de biometano para uso veicular, na ETE Franca. Este projeto é resultado de um Acordo de Cooperação Técnica Internacional, firmado entre a Sabesp e o Instituto

Fraunhofer da Alemanha (Fraunhofer IGB), financiado pela iniciativa internacional de proteção ao clima (IKI) do Ministério Alemão do Meio Ambiente (BMUB) por meio de créditos de carbono pelo lado alemão e com contrapartida da Sabesp, pelo lado brasileiro.

Conforme mencionado, existem diversas tecnologias para efetuar a conversão energética do biogás. Entende-se por conversão energética o processo que transforma um tipo de energia em outro. No caso do biogás a energia química contida em suas moléculas é convertida em energia mecânica por um processo de combustão controlada. Essa energia mecânica ativa um gerador que a converte em energia elétrica (PECORA, 2006).

Os motores térmicos de combustão interna a gás de ciclo Otto de quatro tempos são comumente utilizados para gerar energia elétrica utilizando o biogás como combustível (COSTA, 2006; SILVEIRA *et al.* 2018 e CARVALHO, 2016). Essas máquinas operam a partir de 45% de CH<sub>4</sub> no biogás. Possuem uma vida útil de aproximadamente 60.000 horas de operação, são construídos para serem usados com gás sem precisar de adaptações com baixo índice de manutenção (PROBIOGÁS, 2010).

Para análise de viabilidade de um projeto de aproveitamento energético em uma ETE é necessário conhecer a produção de biogás e o potencial energético dele. Estudos realizados por Silva *et al.* (2014) comprovaram que os modelos de estimativas de biogás, que não levam em consideração as perdas de metano e as conversões da matéria orgânica dentro de reatores UASB, superestimam a produção de biogás e a energia química nele acumulada.

Nesse sentido, no balanço de massa da DQO em reatores UASB, devem ser consideradas todas as parcelas possíveis de conversão da matéria orgânica e perdas de metano, sendo elas: a parcela convertida em metano e presente no biogás; a parcela convertida em metano e perdida junto ao efluente ou gás residual; a parcela de sulfato convertida em sulfeto; a parcela convertida em lodo, e, por fim, a parcela da matéria orgânica solubilizada junto ao efluente (LOBATO, 2011). Dessa forma, Lobato (2011) propõe um modelo matemático que leva em consideração todas essas perdas e rotas de conversões, mostrando como resultado a estimativa de produção de biogás e energia.

Há desafios para utilização do biogás, seja energeticamente ou até mesmo para uma simples queima. No caso de lagoas anaeróbias, suas grandes dimensões e baixas cargas volumétricas não favorecem a produção e coleta de biogás. Porém, já há estudos que propõem o seu fechamento ou cobertura (SALINAS, BUSTOS, 2012).

Geralmente filtros anaeróbios são usados como pós-tratamento em cidades com população superior a 50.000 habitantes, após reatores anaeróbios, garantindo uma maior eficiência do tratamento, sendo que a maior parte da carga orgânica é removida na fase anterior (VALENTE, 2015). Esse é uma das principais razões porque os filtros anaeróbios apresentam uma baixa produção de biogás (MACHADO, 1997).

O reator UASB, em contrapartida, possui uma maior taxa de produção de biogás que os filtros anaeróbios. Aliado a isso, este reator possui um sistema separador trifásico no seu topo, que facilita a coleta do gás produzido. Deste modo, pode-se afirmar, que este é o principal sistema de digestão anaeróbica de esgotos com potencial de aproveitamento do gás utilizado no país (VALENTE, 2015).

De acordo com especialistas e ex-membros do Programa de Pesquisas em Saneamento Básico - PROSAB, os principais desafios tecnológicos para melhorar a produção e coleta do biogás em reatores UASB são: i) regularização da vazão afluente; ii) redução do acúmulo de espuma na câmara de gás dos reatores; iii) redução das perdas de metano dissolvido no efluente do reator e redução dos vazamentos; e iv) perdas de biogás nas estruturas dos separadores de fase (nas campânulas) (PROSAB, 2011).

Os picos de vazão afluente, oriundos principalmente da água da chuva que entra no sistema de coleta, é o principal responsável pelo carregamento da biomassa contida nos reatores anaeróbios (VALENTE, 2015).

Possetti *et al.* (2013) mensuraram a produção de metano em reatores UASB em escala real. Os resultados mostram que a produção de biogás segue um comportamento temporal variável, periódico e não-estacionário, o qual depende criticamente das variações na vazão e da concentração do esgoto durante o dia, sofrendo influências por eventos de chuva.

O biogás gerado em reatores anaeróbios pode ser captado parcialmente, outra parte é eliminada no efluente de forma dissolvida ou escapa no sistema (LOBATO, 2011). Contudo, estudos em reatores anaeróbios observam a

supersaturação do metano na fase líquida (BRASIL, 2015a). Os valores de perda de metano observados na prática variam entre 36 a 41% (SOUZA, 2010).

Normalmente, essa perda aumenta com a carga hidráulica aplicada, mas depende também de fatores como: temperatura e pressão parcial do gás no interior do reator, bem como tamanho da superfície líquida do reator (BRASIL, 2015a).

Para evitar a perda do gás no efluente líquido, Souza (2010) recomenda o uso de uma caixa de dissipação após o reator UASB para remover metano e sulfeto dissolvidos na fase líquida. Segundo o mesmo, a eficiência desta é da ordem de 60%, podendo ser otimizada.

### 2.5.2 Queima do biogás

Além do aproveitamento energético do biogás, há outras maneiras de mitigar os GEE. Alternativamente, se a geração de  $\text{CH}_4$  for insuficiente para garantir a construção de um sistema de recuperação de energia, o  $\text{CH}_4$  pode ser inflamado para que a emissão primária seja  $\text{CO}_2$ , que tem um GWP menor.

Existem basicamente dois tipos de queimadores: abertos e fechados, também denominados enclausurados. Os queimadores, chamados usualmente de flares, são indispensáveis em todas as estações de tratamento de esgoto com etapa anaeróbia, seja ela realizada em reatores do tipo UASB, seja em digestores de lodo (BRASIL, 2015a).

Carvalho (2016) em seu estudo apresenta as principais vantagens entre os queimadores enclausurados ou fechados e os queimadores abertos ou semi-enclausurados, conforme QUADRO 4.

QUADRO 4 – COMPARATIVO DAS VANTAGENS ENTRE OS TIPOS DE QUEIMADORES

Queimadores enclausurados ou fechados	Queimadores abertos ou semi-enclausurados
Destruição altamente eficiente do biogás	Baixo custo
Baixa emissão de poluentes indesejáveis	Nenhuma contenção de gás
As emissões podem ser monitoradas	
Mais seguro nas proximidades em relação ao calor	



---

**Queimadores enclausurados ou fechados****Queimadores abertos ou semi-enclausurados**

---

Sem impacto visual causado pelas chamas

---

Fonte: CARVALHO (2016).

Os dois maiores benefícios da queima do biogás por meio de queimadores, são: redução das emissões de GEE e eliminação dos maus odores. Por outro lado, esse processo de conversão do biogás apresenta três desvantagens: i) emissões de poluentes ambientais não desejados como formaldeído (HCHO), hidrocarbonetos poliaromáticos (PAHs) e óxidos de nitrogênio (NO<sub>x</sub>); ii) poluição sonora pelo ruído emitido pelos queimadores; e, iii) poluição visual noturna com a emissão de chamas incandescentes no caso dos modelos abertos (WOOTTON, 2008).

A vantagem dos queimadores do tipo aberto, típicos em ETEs no Brasil, é que seu correto funcionamento pode ser verificado visualmente através da chama aparente, fato que pode ser visto na FIGURA 4. Além disso, apresentam menores custos que os queimadores enclausurados. Suas desvantagens são a maior área de exclusão devido à radiação provocada pela chama e as menores eficiências de queima (BRASIL, 2015a). Esses queimadores normalmente apresentam uma eficiência aproximada de 50% na conversão de CH<sub>4</sub> para CO<sub>2</sub> (FOKAL, 2017).

FIGURA 4 – QUEIMADOR ABERTO



Fonte: Autor, 2017.



A conversão do biogás em queimadores enclausurados, típicos em ETEs europeias, é caracterizada por uma alta eficiência: até 99,95% do  $\text{CH}_4$  é convertido em  $\text{CO}_2$  e, reduz, conseqüentemente em 89% de massa de  $\text{CO}_2$  que é emitido para a atmosfera (WOOTTON, 2008), quando considerado GWP do metano igual a 25. Nesses queimadores, ilustrados na FIGURA 5, a chama fica confinada dentro de uma câmara de combustão, usualmente em aço carbono, com isolamento térmico por fibra cerâmica que permite temperaturas internas da ordem de  $1.000^\circ\text{C}$  e temperatura externa da parede de aço menor que  $80^\circ\text{C}$  (BRASIL, 2015a).

FIGURA 5 – QUEIMADOR ENCLAUSURADO



Fonte: Autor, 2018.

Carvalho (2016) avaliou em seu estudo, cenários de diminuição de emissões anuais de GEE que contemplaram o uso de queimadores abertos e enclausurados para destruição de metano, bem como uso de motogeradores a biogás para produção de energia elétrica.

Dos cinco cenários propostos, três apresentaram retorno financeiro positivo, variando entre 3,14 e 16,77 milhões de reais por ano. Em relação às reduções das emissões de GEE, identificaram-se taxas variando entre 5,6% e 84,1%. O estudo mostra que não existe um cenário único que atenda plenamente os interesses ambientais e financeiros.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

Após apresentado o contexto brasileiro e paranaense sobre o tratamento de esgotos e as emissões de gases de efeito estufa provenientes dessa atividade, assim como o estado da arte sobre os métodos utilizados para estimativa de emissões de GEE, maneiras de utilização do biogás e medidas de mitigação de GEE, o objetivo do presente capítulo é apresentar a metodologia empregada para elaboração de diretrizes corporativas para redução de emissões de gases de efeito estufa no setor de saneamento.

A seguir descreve-se como foram realizados: i) o diagnóstico da cobertura dos serviços de saneamento prestados atual e dos próximos 20 anos; ii) a estimativa das emissões atuais e para os próximos 20 anos; iii) os cenários de mitigação de emissões; e iv) a análise ambiental e econômica dos cenários.

#### 3.1 DIAGNÓSTICO DA COBERTURA DOS SERVIÇOS DE SANEAMENTO NO PARANÁ

A etapa em questão é de natureza exploratória e quantitativa e foi desenvolvida a partir de dados coletados junto ao prestador de serviços de saneamento em estudo. Para tanto, obtiveram-se dados referentes ao ano de 2015. O Estado do Paraná contém 399 municípios, porém o escopo do estudo contemplou os 345 municípios que contam com abastecimento de água por meio de 170 estações de tratamento de água (ETA), 1.027 poços artesianos e quatro barragens, os 174 municípios que possuem tratamento de esgoto por meio da operação de 234 ETEs e os sete municípios que possuem gestão de resíduos sólidos urbanos atendidos por três aterros sanitários.

A partir da obtenção dos dados no sistema comercial do prestador de serviços de saneamento de todas as ETEs do Estado do Paraná em 2015, os dados foram sistematizados em uma planilha eletrônica. As colunas foram nomeadas como: nome dos municípios com tratamento de esgoto, índice de atendimento com rede coletora de esgoto (IARCE) de cada município, relação das ETEs de cada município, população atendida por cada ETE.

A informação sobre a população atendida por cada ETE foi obtida pela equação (5):

$$P_{trat} = Economias_{esgoto} \cdot ligações_{ETE} \cdot NHD \quad (5)$$

onde:

$P_{trat}$  = população do sistema de tratamento com tratamento no ano de inventário obtido por meio do Sistema de Informações e Gestão do prestador de serviços de saneamento (SISWEB) [número de pessoas] (SANEPAR, 2016b);

$Economias_{esgoto}$  = corresponde ao número de economias com esgoto coletado e tratado por município obtido por meio do SISWEB [número de economias] (SANEPAR, 2016b);

$ligações_{ETE}$  = corresponde à porcentagem da população do município que é atendida pela ETE, aplicável quando se tem mais de uma planta no mesmo município, obtida junto à Unidade de Serviço de Esgoto do prestador de serviços de saneamento [%] (SANEPAR, 2016c);

$NHD$  = é o número de habitantes por domicílio ou economia, que corresponde com a taxa de ocupação estabelecida pelo IBGE (2010) [número de habitante/economia].

Para encontrar a meta prevista para expansão dos serviços de saneamento no Estado do Paraná até 2030, foram consultados os Planos Municipais de Saneamento Básico (PMBS) disponíveis no SISWEB (SANEPAR, 2016b). Para calcular a população dos municípios nos anos de 2016 a 2030 foi utilizada a taxa geométrica de crescimento do IPARDES (2017), conforme equações (6) e (7):

$$Projeção_{pop} \ n + 1 = \frac{Pop_{urbana} \ n \cdot taxa \ geométrica \ n + 1}{100} + Pop_{urbana} \ n \quad (6)$$

$$População \ atendida \ n + 1 = Projeção_{pop} \ n + 1 \cdot IARCE_{n+1} \quad (7)$$

onde:

n: ano [a];

$Projeção_{pop}n+1$  = é a projeção populacional no ano  $n+1$  [número de pessoas];  
 $Pop_{urbana}n$  = é a população urbana de determinado município no ano  $n$  [número de pessoas];  
 Taxa geométrica  $n+1$  = é a taxa geométrica de crescimento populacional prevista pelo IPARDES (2017) [%];  
 População atendida  $n+1$  = é a parcela da população urbana atendida com rede coletora de esgoto no ano  $n+1$  [número de pessoas];  
 $IARCE_{n+1}$  = índice de atendimento com rede coletora de esgoto no ano  $n+1$  previsto no PMSB de cada município (SANEPAR, 2016b) [%].

Para os municípios que não tinham sistema de esgotamento sanitário em 2015 foi considerada a população urbana de 2015 do IBGE, para o cálculo da população em 2020, 2025 e 2030.

A partir da obtenção dos dados populacionais e de cobertura dos serviços de saneamento de cada município, foi elaborada uma planilha eletrônica com as seguintes informações: nome do município com tratamento de esgoto em 2015 ou com previsão dos serviços até 2030, IARCE de cada município de 2015 a 2030, população prevista em cada município de 2016 a 2030, população atendida em cada município de 2015 a 2030. O valor do IARCE atual e o planejamento dele nos próximos anos foi retirado dos PMSB de cada município, que foram consultados por meio do SISWEB (SANEPAR, 2016b).

### 3.2 ESTIMATIVA DAS EMISSÕES DE GASES DE EFEITO ESTUFA

A estimativa das emissões de gases de efeito estufa provenientes das atividades do prestador de serviços de saneamento do Paraná foi realizada com base nos métodos disponibilizados pelo IPCC e pelo PBGHGP descritos nos itens 2.4.1 e 2.4.2.

A contabilização e quantificação das emissões de GEE seguiram com os cinco princípios apresentados no *GHG Protocol Corporate Standard* e na norma ISO14064-1: relevância, integralidade, consistência, transparência e exatidão.

A sequência de passos do fluxograma da

FIGURA 2, p.47 foi realizada a fim de se definir os limites do IGEE. Sendo assim, foram definidos os limites geográficos como território brasileiro; os limites organizacionais como controle operacional; e os limites operacionais como todas as unidades operacionais e comerciais.

Determinados os limites operacionais, foram identificadas as emissões associadas com as atividades do prestador de serviços de saneamento, classificando-as por tipo de emissão, escopo e categoria, conforme QUADRO 3, p.48.

Em todos os cálculos, a fim de se obter a emissão em termos de CO<sub>2</sub>e, unidade de medição de GEE, multiplicou-se o valor obtido para as emissões de cada gás pelo valor correspondente ao seu GWP em relação ao CO<sub>2</sub>, conforme TABELA 1, p.51.

Para o cálculo das emissões provenientes da combustão móvel e estacionária foram considerados os dados de consumo de combustíveis lançados no Sistema de Suporte Administrativo do prestador de serviço. Estes valores foram multiplicados por seus respectivos fatores de emissão conforme mostra a TABELA 2, obtendo-se assim o valor total de emissões provenientes da queima de combustível. Foram considerados 7% de biodiesel no diesel e 26,586% de etanol anidro na gasolina (ANP, 2012).

TABELA 2 – FATORES DE EMISSÃO DE COMBUSTÍVEIS

Combustível	CO <sub>2</sub> [kg·un <sup>-1</sup> ]	CH <sub>4</sub> [kg·un <sup>-1</sup> ]	N <sub>2</sub> O [kg·un <sup>-1</sup> ]
Diesel	2,603	1,385·10 <sup>-4</sup>	1,385·10 <sup>-4</sup>
GNV	1,999	33,896·10 <sup>-4</sup>	1,105·10 <sup>-4</sup>
Gasolina	2,212	8,077·10 <sup>-4</sup>	2,585·10 <sup>-4</sup>
GLP	2,932	28,814·10 <sup>-4</sup>	9,295·10 <sup>-5</sup>
Etanol hidratado	1,457	3,814·10 <sup>-4</sup>	1,280·10 <sup>-5</sup>
Biodiesel	2,431	3,316·10 <sup>-4</sup>	1,990·10 <sup>-5</sup>
Etanol anidro	1,526	2,235·10 <sup>-4</sup>	1,341·10 <sup>-5</sup>

FONTE: Adaptado de *GHG Protocol* (2017).

Para o cálculo das emissões oriundas da compra de energia elétrica foram obtidos os dados de consumo mensal por unidade no sistema de gerenciamento de faturas do prestador de serviços de saneamento (SANEPAR, 2016d) e foram utilizados os fatores de emissão do SIN determinado pelo MCTIC, conforme TABELA 3.

TABELA 3 – FATORES DE EMISSÃO MENSAIS DO SIN DO ANO DE 2015

<b>Mês</b>	<b>Fator de emissão [tCO<sub>2</sub>/MWh]</b>
Janeiro	0,1275
Fevereiro	0,1321
Março	0,1369
Abril	0,1301
Maio	0,1258
Junho	0,1406
Julho	0,1221
Agosto	0,1183
Setembro	0,1217
Outubro	0,1180
Novembro	0,1127
Dezembro	0,1075

FONTE: Adaptado de MCTIC, 2016.

Para o cálculo das emissões fugitivas foi considerada a listagem dos equipamentos adquiridos, em operação e desativados disponibilizados anualmente pela unidade de serviços contábeis do prestador de serviços de saneamento. No entanto, no cadastro não há informações sobre a quantidade de gás de cada equipamento e até o momento, não há dados parametrizados sobre a manutenção dos equipamentos. Sendo assim, foi necessário realizar uma estimativa baseada em fatores de emissão e taxas de vazamento padrão dos equipamentos contida na metodologia GHG Protocol, conforme preconiza IPCC (2006). Os fatores utilizados têm alto grau de incerteza, porém são extremamente conservadores.

A partir da listagem dos equipamentos foi totalizado o número de aparelhos de ar condicionado, refrigeradores e bebedouros, adquiridos a partir de 2010, ano em que os gases começaram a ser utilizados no Brasil (MMA, 2013). No caso do ar condicionado, foi considerado que o gás utilizado é o R-410A, enquanto que nos refrigeradores e bebedouros o gás foi HFC-134a. Como não há informações sobre a capacidade dos equipamentos, foi utilizado o valor máximo, conforme indicado no QUADRO 5.

QUADRO 5 – CAPACIDADE DE GÁS REFRIGERANTE E FATORES DE EMISSÃO POR TIPO DE EQUIPAMENTO

Tipo de equipamento	Capacidade (kg)	k - Fator de emissão na instalação (% da capacidade/a)	x - Fator de Emissões durante a operação (% da capacidade/a)	y – Gás Refrigerante restante disponível (% da capacidade/a)	z - Eficiência de Recuperação (% de recuperação)
Refrigeração Residencial	0,05–0,5	1	0,5	80	70
Bebedouro Comercial Individual	0,2–6	3	15	80	70
Ar Condicionado Residencial / Comercial	0,5–100	1	10	80	80

Fonte: IPCC, 2006.

A partir dos dados de capacidade de gás em cada equipamento, dos fatores de emissão padrão da ferramenta GHG Protocol em cada etapa da vida útil do equipamento, e dos seus respectivos valores de GWP da TABELA 1, p. 51 as emissões provenientes dos equipamentos são calculadas conforme equação (8).

$$Emissões_{RAC} = \sum [UN \cdot k + UO \cdot x \cdot T + UD \cdot y \cdot (1 - z)] \cdot Capacidade \cdot GWP \quad (8)$$

onde:

Emissões<sub>RAC</sub> = Emissões fugitivas [tCO<sub>2</sub>e];

UN = Unidades novas [número de equipamentos];

k = Fator de emissão na instalação [%];

UO = Unidades em operação [número de equipamentos];

x = Fator de emissão durante a operação [%];

T = Tempo de utilização ao longo do ano [considerou-se 1 ano];

UD = Unidades dispensadas [número de equipamentos];

y = quantidade de gás disponível [%];

z = gás recuperado (%);

Capacidade = Capacidade de gás refrigerante por equipamento [kg];

GWP = Potencial de aquecimento global referente ao gás refrigerante [CO<sub>2</sub>e].

Para a estimativa das emissões de CH<sub>4</sub> nos aterros sanitários foram utilizados, quando disponíveis, dados específicos dos locais. Na falta destas informações foram adotados os valores padrão recomendados pelo IPCC (2006)

para a ferramenta. No QUADRO 6 são apresentados os principais parâmetros específicos estabelecidos para o cálculo das emissões de metano nos aterros sanitários.

QUADRO 6 – PARÂMETROS ESPECÍFICOS DEFINIDOS PARA OS ATERROS SANITÁRIOS

Parâmetro	Premissas
Zona climática	Foi adotada a classificação “moist and wet tropical” do IPCC em função das referências do IAPAR de temperatura anual média e precipitação anual média para os municípios de Cianorte, Apucarana e Cornélio Procópio.
Composição dos resíduos encaminhados para disposição final	Baseada em dados operacionais de cada aterro disponibilizados pela Unidade de Gestão de Resíduos Sólidos do prestador de serviços (SANEPAR, 2016e).
Fator de correção de metano (MCF)	O índice de atendimento de coleta de resíduos na área urbana foi considerado 100%, conforme média nacional indicada pelo SNIS (BRASIL, 2017a). Da mesma forma foi adotado que 100% dos resíduos coletados são encaminhados para a área de disposição final nos 3 aterros.
Quantidade total de resíduos sólidos municipais	Foram utilizados dados operacionais de pesagem dos resíduos recebidos em 2015 em cada aterro sanitário foram disponibilizados pela Unidade de Gestão de Resíduos Sólidos do prestador de serviços (SANEPAR, 2016e).
Fator de oxidação do metano (OX)	Em função de não existirem dados específicos de difusão de metano através da camada de cobertura dos aterros operados, tampouco medições de emissões fugitivas (fissuras, rachaduras) nas células, foi utilizado o valor padrão recomendado para fator de oxidação do metano igual a zero.
Metano recuperado (R):	Em função da indisponibilidade de informações sobre a existência de sistema de drenagem de gases, bem como a existência de queimadores e eficiência destes equipamentos, foi utilizado o valor de metano recuperado igual a zero conforme recomendação da metodologia IPCC (2006).

FONTE: Adaptado de *GHG Protocol*, 2017.

Para a estimativa das emissões de CH<sub>4</sub> nas ETEs, a única variável do cálculo é a população atendida por cada ETE, a qual é calculada pela equação (7), p.67. Os demais parâmetros da equação (1), p.53 foram definidos com base na literatura, conforme TABELA 4, TABELA 5, TABELA 6.



TABELA 4 – PARÂMETROS PARA CÁLCULO CH<sub>4</sub> EM ETES

Constante	Valor / Unidade	Justificativa
U	1	Por mais que a companhia receba efluentes de diferentes classes sociais, o tipo de tratamento será sempre o mesmo.
T	100%	Considera-se que todo efluente coletado é tratado.
B <sub>o</sub>	0,6 kg/kg	Cap. 6, p.12, IPCC, 2006.
DBO	0,054 kg/(h.d)	Von Sperling (2005) p.110
I	1	Consideram-se apenas efluentes domésticos.
S	0	Como não se dispõe de dado específico, o método recomenda utilizar zero.

TABELA 5 – FATOR MÉDIO DE CONVERSÃO DE CH<sub>4</sub>

Constante	MCF [adimensional]
Reator anaeróbio	0,8
Fossa ou vala	0,5
Digestor de lodo	0,8
Lagoa anaeróbia ou facultativa	0,8
Filtro anaeróbio	0,8
Filtro biológico aeróbio	0,3
Filtro aerado submerso	0,3
Lodo ativado convencional ou de aeração prolongada mal operado	0,3
Lodo ativado convencional ou de aeração prolongada bem operado	0,0
Saída	0,1

Legenda: MCF<sub>j</sub> = fator de correção do metano, conforme equação (1).

FONTE: Adaptado de IPCC (2006).

TABELA 6 – EFICIÊNCIA MÍNIMA DE REMOÇÃO DE DBO POR ETAPA DO TRATAMENTO DE EFLUENTES

Constante	Eficiência
Reator anaeróbio	0,6
Fossa ou vala	0,7
Lagoa anaeróbia ou facultativa	0,7
Filtro anaeróbio	0,7
Filtro biológico aeróbio	0,8
Filtro aerado submerso	0,8
Lodo ativado convencional ou de aeração prolongada	0,93

FONTE: Adaptado de VON SPERLING (2005).

O método do IPCC (2006) permite reduzir da quantidade total de CH<sub>4</sub> gerado, a parcela que é queimada ou utilizada para fins energéticos. Dessa forma, foi considerado que as ETES que possuem *flare* aberto com ignição automática evitam parte das emissões de CH<sub>4</sub>, emitindo CO<sub>2</sub> biogênico. As informações referentes à existência de queimadores e o funcionamento dos mesmos (fator manutenção) foram obtidas junto aos coordenadores industriais das unidades regionais do prestador de serviço de saneamento (SANEPAR, 2016c).

A quantidade de CH<sub>4</sub> abatido pelos queimadores nas ETEs foi obtida pela equação (9) (IPCC, 2006).

$$R = (B_o \cdot MCF_j) \cdot (P_{trat} \cdot DBO \cdot 365 \cdot 0,001 \cdot \eta_j \cdot I) \cdot ((1 - perda) \cdot T_{manu} \cdot \eta_q) \quad (9)$$

onde:

R = Quantidade de CH<sub>4</sub> recuperado [kg];

B<sub>0</sub> = máxima capacidade de produção de metano por DBO [kg·kg<sup>-1</sup>];

MCF<sub>j</sub> = fator de correção do metano corresponde a etapa j do sistema de tratamento [adimensional];

P<sub>trat</sub> = população do sistema de tratamento [número de pessoas];

DBO = DBO per capita [g·hab<sup>-1</sup>·d<sup>-1</sup>];

η<sub>j</sub> = eficiência da etapa j do sistema de tratamento no ano de inventário;

I = fator de correção pelo descarte adicional de esgoto industrial na rede de esgoto;

*perda* = corresponde às perdas de biogás no meio líquido, que segundo Souza (2006) chega a 38%;

T<sub>manu</sub> = corresponde ao tempo que o queimador ficou sem funcionar devido a manutenção ao longo do ano inventariado;

η<sub>q</sub> = eficiência do queimador, que segundo fornecedores devido à combustão incompleta é em torno de 50% (FOKAL, 2017).

Para a estimativa das emissões de N<sub>2</sub>O nas ETEs foram definidos alguns parâmetros para as equações (2) e (3), p.54, conforme TABELA 7.

TABELA 7 – PARÂMETROS PARA CÁLCULO DE N<sub>2</sub>O EM ETEs

Parâmetros	Valor / Unidade
P <sub>prot</sub> <sup>1</sup>	30,6 kg <sub>prot</sub> ·hab <sup>-1</sup> ·a <sup>-1</sup>
F <sub>NPR</sub> <sup>2</sup>	0,16 kg·kg <sub>prot</sub> <sup>-1</sup>
F <sub>non</sub> <sup>2,3</sup>	1,1
EF <sub>efluente</sub> <sup>2</sup>	0,005 kg·kg <sup>-1</sup>
F <sub>ind/com</sub> <sup>2</sup>	1,0
T <sub>planta</sub> <sup>2</sup>	100%
EF <sub>planta</sub> <sup>2</sup>	3,2 g·hab <sup>-1</sup> ·a <sup>-1</sup>

Fonte: <sup>1</sup>FAO Statistical; <sup>2</sup>IPCC (2006); <sup>3</sup>em países em desenvolvimento.

Para determinar a quantidade de nitrogênio removido no lodo, multiplicou-se a quantidade de matéria seca do lodo destinado para agricultura pelo percentual de nitrogênio presente no lodo. Considerou-se que 3% do lodo seja composto por nitrogênio, conforme Metcalf & Eddy (2013).

Estudos de Alvim *et al.* (2014) e Bortoli *et al.* (2012) mostram que quando a ETE possui sistema de tratamento anaeróbio seguido de pós-tratamento aeróbio, as emissões diretas de  $N_2O$  tendem a zero pelo fato do sistema não remover nitrogênio. Sendo assim como premissa de cálculo, as emissões diretas de  $N_2O$  foram calculadas apenas para plantas aeróbias, e as emissões indiretas de  $N_2O$  nas plantas anaeróbias com ou sem pós-tratamento.

### 3.3 CENÁRIOS DE MITIGAÇÃO DE EMISSÕES DE GASES DE EFEITO ESTUFA

Para embasar a elaboração de políticas e diretrizes corporativas para gestão de emissões GEE, foram realizadas estimativas de emissões considerando o aumento populacional previsto pelo IPARDES (2017), as metas de universalização dos serviços de saneamento dos Planos Municipais de Saneamento Básico e adoção de seis cenários tecnológicos distintos, simulando os cenários de redução das emissões de GEE I, II, III, IV, V e VI utilizando o *software* Excel<sup>®</sup>.

Foram estimadas as emissões para os anos 2020, 2025 e 2030 considerando o planejamento existente e adoção de medidas de mitigação com diferentes soluções.

No cenário I, considerou-se que a minimização das emissões de GEE seria por meio da instalação de queimadores abertos com ignição automática nas unidades em que tais equipamentos não estão presentes e nas novas ETEs previstas. Esse cenário foi adotado como linha de base (LB), tendo em vista que a Resolução SEMA 016/2014, que define os critérios para o Controle da Qualidade do Ar, estabelece em seu Art. 58 que o biogás gerado em reatores de digestão anaeróbia deve ser aproveitado e na impossibilidade de seu aproveitamento será necessária sua queima, com a instalação e operação contínua de queimadores para conversão do metano. Os queimadores abertos são caracterizados pela baixa eficiência de conversão de  $CH_4$  para  $CO_2$ . Assumiu-se 50% de eficiência, baseado em manuais de fabricantes (FOKAL, 2017).

No cenário II, considerou-se que a mitigação das emissões de GEE ocorreria com a instalação de queimadores enclausurados com alta eficiência de destruição do metano, ou seja, 99% em todas as ETEs (novas e antigas).

Dentro do programa Probiogás do Ministério das Cidades, foi realizado um estudo de viabilidade técnico-econômica de produção de energia elétrica em ETEs no Brasil a partir do biogás (BRASIL, 2016a), e apenas ETEs com capacidade superior a 100.000 habitantes demonstram viabilidade para aproveitamento energético. Por esse motivo, nos cenários propostos assumiu-se uma população de 100.000 como linha de corte para instalação de uma ou outra tecnologia.

Assim, para o cenário III, adotou-se a instalação de queimadores enclausurados apenas em ETEs que atendem mais que 100.000 habitantes. Para as demais ETEs considerou-se a instalação de queimadores abertos como no cenário I.

No cenário IV, considerou-se que a redução das emissões de GEE seria alcançada por meio da implantação de sistemas de captura e aproveitamento energético nas mesmas ETEs do cenário III. Adotou-se uma eficiência de 80% na transformação de  $\text{CH}_4$  para  $\text{CO}_2$  dos motores ciclo Otto. Nas demais ETEs que não receberiam esses sistemas, considerou-se a instalação de queimadores abertos semelhantes àqueles adotados nos cenários I e III.

O estudo do Próbiogás (BRASIL, 2016a) também comparou cinco configurações para plantas de tratamento de efluentes. E um sistema composto por reator anaeróbio e tanque de aeração tipo lodo ativado convencional com sistema de aproveitamento energético de biogás apresenta melhor viabilidade financeira.

Sendo assim, no cenário V, considerou-se a mudança no processo de tratamento em ETEs com capacidade para atender mais de 100.000 habitantes. Para essas estações foi adotada uma configuração de tratamento de reator anaeróbio seguido de lodo ativado convencional, com aproveitamento do biogás utilizando motogeradores. Nas estações que já possuíam reator anaeróbio, considerou-se que seria necessária apenas a instalação de reator de lodo ativado convencional. Nas estações menores foi mantido o tratamento e queimador aberto, como nos cenários I, III e IV.

No cenário VI, por sua vez, assumiu-se que a mitigação das emissões de GEE nas maiores ETEs ocorreria de forma semelhante àquela fixada para o cenário V, porém nas ETEs menores o sistema de pós-tratamento composto por no mínimo

filtro biológico aeróbio e decantador secundário, além da adoção de queimadores com tecnologias de alta eficiência, semelhante àqueles adotados no cenário II.

Com a intenção de comparar as emissões de diferentes sistemas de tratamento, no cenário VII, considerou-se que nas ETEs maiores e nas novas o tratamento seria exclusivamente aeróbio composto por lodo ativado convencional, com desativação de reatores anaeróbios, se necessário. Nas estações menores foi mantido o tratamento e o queimador aberto, como nos cenários I, III, IV e V.

No QUADRO 7 são descritas as tecnologias consideradas em cada cenário.

QUADRO 7 – CARACTERÍSTICAS DEFINIDAS EM CADA CENÁRIO

<b>Cenário</b>	<b>Características ETEs que atendem menos de 100.000 habitantes</b>	<b>Características ETEs que atendem mais de 100.000 habitantes</b>
Linha de base	Instalação de queimadores abertos	Instalação de queimadores abertos
Cenário II	Sistema de tratamento existente + Instalação de queimadores enclausurado	Sistema de tratamento existente + Instalação de queimadores enclausurado
Cenário III	Sistema de tratamento existente + queimadores abertos	Sistema de tratamento existente + Instalação de queimadores enclausurado
Cenário IV	Sistema de tratamento existente + queimadores abertos	Sistema de tratamento existente + Instalação de sistema de aproveitamento energético
Cenário V	Sistema de tratamento existente + queimadores abertos	Sistema de tratamento composto por UASB + LDAT + Instalação de sistema de aproveitamento energético
Cenário VI	Sistema de tratamento composto por UASB + FBA + DS + queimador enclausurado	Sistema de tratamento composto por UASB + LDAT + Instalação de sistema de aproveitamento energético
Cenário VII	Sistema de tratamento existente + queimadores abertos ETEs novas: sistema de tratamento composto apenas por LDAT	Sistema de tratamento composto apenas por LDAT (desativação de UASB)

UASB: reator anaeróbio, LDAT: lodo ativado convencional, FBA: filtro biológico aeróbio, DS: decantador secundário.

Baseada nos estudos de Valente (2015), Carvalho (2016) e Santos *et. al.* (2014), o QUADRO 8 apresenta os principais componentes necessários para um sistema de queima ou aproveitamento energético do biogás.

QUADRO 8 – COMPONENTES COMPLEMENTARES NOS SISTEMAS DE CAPTURA, QUEIMA E APROVEITAMENTO DO BIOGÁS

Equipamento	Função	Sistema queima aberta	Sistema de queima enclausurada	Sistema de aproveitamento energético
Tanque de drenagem	Retirada de umidade		X	X
Gasômetro	Armazenamento de gás		X	X
Filtro de carvão ativado	Eliminação de impurezas			X
Dessulfurização	Retirada de H <sub>2</sub> S		X	X
Compressor	Aumento de pressão		X	X
Medidor de gás	Medição da produção de gás	X	X	X
Analizador de gás	Medição de componentes do gás	X	X	X

Sendo assim, no cenário I, além do queimador aberto, foi considerada a instalação de um medidor e um analisador de gás. Nos cenários II e VI em que haverá a instalação de queimadores enclausurados, o sistema de queima é composto por tanque de drenagem, gasômetro, dessulfurizador, compressor, medidor e analisador de gás, além do queimador. Nos sistemas de aproveitamento energético, previstos nos cenários V e VI há a instalação de 2 tanques de drenagem e um filtro de carvão ativado, além dos equipamentos considerados nos sistemas de queima enclausurada.

Para embasar a comparação entre os cenários propostos foi calculada a redução de emissões em relação à LB de cada ano, por meio da equação (10) e a eficiência média de remoção de carga orgânica entre as ETEs de cada cenário baseada nas eficiências mínimas de cada sistema de tratamento conforme TABELA 6, p.73.

$$Redução = \frac{emissões_y - emissões_{LB}}{emissões_{LB}} \quad (10)$$

onde:

Redução = Redução de emissões no cenário y em relação à LB [%];

Emissões<sub>LB</sub> = emissões de GEE no cenário LB [tCO<sub>2</sub>e];

Emissões<sub>y</sub> = emissões de GEE no cenário y [tCO<sub>2</sub>e].

Foram elaborados gráficos para evidenciar a diferença das emissões entre os cenários propostos em cada ano, destacando-se: (1) as emissões evitadas pela

instalação de equipamentos; (2) as emissões líquidas, as quais são calculadas pela diferença entre os resultados da equação (1), p.53 e (9), p.74; (3) a eficiência média de remoção de carga orgânica; (4) as emissões da LB.

### 3.3.1 Levantamento de custos

Para estimativa do custo de implantação e operação dos sistemas de queima e aproveitamento energético do biogás, foram utilizados os valores levantados por Valente (2015) e Carvalho (2016), corrigidos pelo IPCA-E IBGE (mar/16 a mar/18) conforme apresentado na TABELA 8, TABELA 9, TABELA 10.

TABELA 8 – CUSTO POR EQUIPAMENTO PARA INSTALAÇÃO DE SISTEMAS DE QUEIMA E APROVEITAMENTO ENERGÉTICO DO BIOGÁS.

Volume de biogás [m <sup>3</sup> ·h <sup>-1</sup> ]	Custo do Tanque de drenagem [R\$]	Filtro de carvão ativado [R\$]	Dessulfurizador [R\$]	Compressor [R\$]
Até 700	16.435,22	43.250,59	151.377,06	54.063,24
701-1.400	19.246,51	43.250,59	178.408,68	64.875,88
1.401-2.800	21.084,66	64.875,88	198.952,70	75.688,53
2.801-6.300	23.787,82	86.501,18	227.065,59	86.501,18

Fonte: Adaptado de Valente (2015) e Carvalho (2016).

TABELA 9 – CUSTO DE QUEIMADORES

Volume de biogás [m <sup>3</sup> ·h <sup>-1</sup> ]	Custo capital de queimador aberto [R\$]	Volume de biogás [m <sup>3</sup> ·h <sup>-1</sup> ]	Custo capital de queimador enclausurado [R\$]
Até 7	17.300,22		-
8-28	29.194,13	Até 50	83.839,10
29-65	32.437,92	51-100	95.678,95
66-110	37.844,24	101-150	107.518,80
111-250	54.063,20	151-250	131.198,50
251-570	64.875,84	251-400	166.718,04
571-850	97.313,76	400-2000	545.593,19

Fonte: Adaptado Carvalho (2016).

TABELA 10 – CUSTO E EFICIÊNCIA DO MOTOGERADOR

Potência [kW]	Custo capital do motogerador [R\$]/kW <sup>1</sup>	Rendimento elétrico [%] <sup>2</sup>
Até 33	15.172,31	28
34-50	13.655,08	32
51-100	11.075,78	36
101-250	8.193,05	38
251-400	6.675,81	40
401-800	4.855,14	42
801-1200	3.944,80	42

Fonte: <sup>1</sup>Valores de Carvalho (2016) corrigidos pelo IPCA-E IBGE (mar/16 a mar/18), cotação do Euro R\$4,201 (19/04/2018). <sup>2</sup>Valente (2015).

Visando regularizar a queima, a instalação de gasômetro é necessária para armazenar o biogás. Como o Brasil ainda não dispõe de normas para aproveitamento energético elétrico em ETEs, nesse trabalho assim como nos estudos de Valente (2015) e Carvalho (2016), foram considerados gasômetros com dimensões volumétricas para atender 35% da vazão diária de biogás em cada ETE.

TABELA 11 – CUSTO GASÔMETRO

<b>Volume de biogás [m<sup>3</sup>.d<sup>-1</sup>]</b>	<b>Custo do Gasômetro [R\$]</b>
Até 700	286.535,15
701-1.400	416.286,91
1.401-2.800	567.663,97
2.801-6.300	632.539,85

Fonte: Carvalho (2016).

Além dos equipamentos já mencionados, assumiu-se a inserção de dois equipamentos para medir a produção e concentração do biogás após a filtragem para controle da produção nas ETEs.

Baseado no levantamento de Carvalho (2016), para a medição, optou-se pelo modelo tipo Vortex com custo corrigido de R\$ 25.619,49. Para o analisador fixo de gases, optou pelo modelo com capacidade para medir as concentrações de CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, H<sub>2</sub>S e O<sub>2</sub>, com o custo corrigido de R\$ 23.531,56. Para todas as ETEs considerou-se o uso de um equipamento do mesmo modelo e capacidade. Custos de tubulações, conexões e válvulas não foram considerados, assim como a depreciação dos equipamentos.

Segundo Postel, Jung e Ficher (2010) o custo de manutenção para plantas de biogás varia entre 1 a 2% do custo de investimento. Como medida conservadora adotou-se 2% ao ano. Para o cálculo de custo de manutenção foi considerada uma vida útil de 20 anos de cada equipamento (FOKAL, 2017).

Já o custo de manutenção preventiva dos motogeradores depende da potência instalada e ocorrem em média a cada cinco anos conforme consultas de Valente (2015).

Estudos mencionados na revisão bibliográfica mostram que há perdas de biogás ao longo do processo de tratamento numa estação, que fazem com que nem todo biogás produzido em reatores UASB cheguem até a linha de gás.



Sendo assim, para evitar superestimativa e investimentos errôneos, para o cálculo do potencial energético das ETEs, adotou-se uma produção média de biogás de  $0,014 \text{ Nm}^3 \cdot \text{hab}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$  (Valente, 2015). Considerou-se que 70% do biogás é composto por metano, o qual possui um poder calorífico igual a  $9,96 \text{ kWh} \cdot \text{m}^{-3}$  (LOBATO, 2011).

Para a estimativa de custo de implantação e operação da mudança de tipo de tratamento e consumo de energia, foram utilizadas a Resolução ANA 601/2015 (ANA, 2015) e informações de Von Sperling (2005), apresentados na TABELA 12. Os valores foram corrigidos pelo IPCA-E IBGE e a cotação do dólar foi considerada R\$ 3,50, em 15/11/2017 (BANCO CENTRAL, 2017).

TABELA 12 – CUSTO PARA INSTALAÇÃO, OPERAÇÃO E MANUTENÇÃO DE SISTEMAS DE TRATAMENTO BASEADO EM EFICIÊNCIA.

Sistema <sup>2</sup>	Eficiência em DBO [%]	Potência consumida [kWh/hab·a]	Implantação <sup>1</sup> [R\$/hab]	Operação <sup>1</sup> [R\$/hab·a]
LF	75-85	0	65-130	3-6,5
LA + LF	75-85	0	50-120	3-6,5
UASB	60-75	0	50-80	4-6
UASB + FAN	75-87	0	75-115	5,5-9
UASB + FBA	80-93	0	100-145	8-12
UASB + FBAS	83-93	14-20	105-160	11-20
UASB + FAD	83-93	8-12	100-145	9,5-14,5
UASB + lagoa	77-87	0	65-115	7-11,5
UASB + LDAT	83-93	14-20	115-180	11-20
LDAT	85-95	18-26	160-260	16-32,5
AERPR	90-97	20-35	145-195	16-32,5

Fonte: Adaptado de Von Sperling (2005) e balizado pela Resolução ANA 601/2015.

<sup>1</sup> Valores corrigidos pelo IPCA-E IBGE e cotação do Dólar R\$3,50 (15/11/2017).

<sup>2</sup> LA: lagoa anaeróbia, LF: lagoa facultativa; UASB: reator anaeróbio, FAN: filtro anaeróbio; FBA: filtro biológico aeróbio; FBAS: Filtro biológico aerado submerso; FAD: flotador de ar dissolvido; LDAT: Lodo ativado convencional; AERPR: lodo ativado com aeração prolongada.

Uma vez calculado o potencial de geração de energia elétrica das ETEs, pela equação (11), foi calculado o custo evitado com energia elétrica para ser confrontado com os custos de investimentos. Para esse cálculo, usou-se o custo de R\$0,58751/kWh para a energia elétrica (COPEL, 2018), já com impostos e com o desconto de 15% adotado pela companhia de energia para serviços de saneamento.

$$Potencial_{energia} = P_{TRAT} \cdot 0,014 \cdot 0,7 \cdot 9,96 \cdot \varepsilon_m \quad (11)$$

onde:

$\text{Potencial}_{\text{energia}}$  = Potencial de geração de energia elétrica [ $\text{kWh}\cdot\text{d}^{-1}$ ];

$P_{\text{TRAT}}$  = População atendida pelo sistema de tratamento de esgoto [habitantes];

$\varepsilon_m$  = Eficiência do motogerador [%].

Por fim, para comparação entre os cenários, foi montado um fluxo de caixa com os custos de investimento inicial e os custos com manutenção de cada tecnologia. O valor foi trazido para o presente por meio do cálculo do custo anual líquido de cada cenário, a partir da equação (12).

$$P = \frac{A(1+i)^{n+1}}{i(1+i)^n} \quad (12)$$

onde:

P: Valor Presente Líquido [R\$];

A: Valor futuro [R\$];

i: Taxa de juros, nesse caso 0,06;

n: número de períodos, nesse caso 20 anos.

Como base, a taxa de juros considerada reflete as taxas adotadas pela Caixa Econômica Federal (CEF) para o setor de saneamento. A CEF, junto com o BNDES, é atualmente o principal agente operador dos recursos do Programa Saneamento para Todos. A taxa de juros praticada é de 6% a.a. conforme item 6.1 da Instrução Normativa nº 39/2012 (BRASIL, 2012).

### 3.3.2 Análise de cenários

A análise dos cenários de mitigação de GEE foi realizada por meio de gráficos de custo marginal de abatimento de emissões (CMA) procurando identificar o custo para reduzir uma tonelada de  $\text{CO}_2$  equivalente de cada cenário proposto no ano de 2030.

O cálculo do custo marginal de abatimento foi baseado no Estudo de Baixo Carbono para o Brasil do Banco Mundial (GOUVELLO *et al.*, 2010) obtido pela

divisão entre a variação dos custos anuais líquidos sobre a variação das emissões líquidas de cada tecnologia, conforme equação (13).

$$CMA = \frac{CAL_{tb} - CAL_{ta}}{EA_{tb} - EA_{ta}} \quad (13)$$

onde:

CMA = Custo Marginal de Abatimento da tecnologia de mitigação de GEE [R\$.tCO<sub>2</sub>e<sup>-1</sup>];

CAL<sub>tb</sub> = Custo anual líquido da tecnologia atual (base) [R\$];

CAL<sub>ta</sub> = Custo anual líquido da tecnologia de abatimento [R\$];

EA<sub>tb</sub> = Emissões líquidas de GEE com tecnologia atual (base) [tCO<sub>2</sub>e];

EA<sub>ta</sub> = Emissões líquidas GEE com tecnologia de abatimento [tCO<sub>2</sub>e].

As curvas de CMA para cada cenário proposto foram elaboradas da seguinte maneira:

- No eixo horizontal são exibidas as reduções de emissões acumuladas em ordem crescente. A redução de emissões é calculada pela diferença entre a estimativa de emissões no cenário em questão pela estimativa da linha de base. A redução de emissões acumulada é realizada colocando a redução de emissões por ETE de ordem decrescente e somando a primeira com a segunda, o resultado com a terceira e assim por diante.
- No eixo vertical principal é mostrado o custo por emissão evitada, calculado pela divisão do investimento necessário ao longo dos 20 anos pela quantidade de emissões evitadas por cada ETE.
- No eixo vertical secundário é exibida a redução acumulada em porcentagem, assim é possível observar o impacto do acréscimo de cada ETE no cenário proposto até atingir 100% da redução prevista.

Além do CMA, foram definidos indicadores que fornecem informações sobre desempenho de cada cenário. O primeiro deles foi chamado de pegada de metano, o qual calcula a quantidade de emissões de metano em kgCO<sub>2</sub>e pelo volume teórico de efluente tratado em m<sup>3</sup>, definido pela equação (14). O segundo foi chamado de intensidade carbônica, o qual calcula a quantidade de emissões diretas (CH<sub>4</sub> + N<sub>2</sub>O) em tCO<sub>2</sub>e pela população atendida em habitantes, definido pela equação (15).

$$Pegada CH_4 = \frac{Emissões CH_4}{Volume de efluente tratado} \quad (14)$$

onde:

Pegada CH<sub>4</sub> = Indicador pegada de metano [kgCO<sub>2</sub>e·m<sup>-3</sup>];

Emissões CH<sub>4</sub> = Emissões diretas anuais de CH<sub>4</sub> provenientes do tratamento de efluentes [kgCO<sub>2</sub>e];

Volume de efluente tratado = Volume de efluente tratado em um ano [m<sup>3</sup>].

$$ICO_2 = \frac{Emissões diretas}{População atendida} \quad (15)$$

onde:

ICO<sub>2</sub> = Indicador de intensidade carbônica [tCO<sub>2</sub>e·hab<sup>-1</sup>];

Emissões diretas = Emissões diretas de CH<sub>4</sub> e N<sub>2</sub>O provenientes do tratamento de efluentes [tCO<sub>2</sub>e];

População atendida = Número de habitantes com tratamento de efluentes [hab].

As emissões de CH<sub>4</sub> e N<sub>2</sub>O em tCO<sub>2</sub>e são calculadas utilizando os valores de GWP da TABELA 1, p.51.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1 DIAGNÓSTICO DA COBERTURA DOS SERVIÇOS DO PRESTADOR DE SERVIÇO DE SANEAMENTO

Em 2015, a infraestrutura do prestador de serviços de saneamento em estudo contava com 7.473 colaboradores, 170 ETAs, 234 ETEs e 3 aterros sanitários, além de instalações como estações elevatórias, rede de coleta de esgoto e distribuição de água que superam 75.000 km.

O prestador de serviços de saneamento atende 100% da população urbana com rede de abastecimento de água nos 345 municípios que possui a concessão dos serviços, e trata 99,5% do esgoto que coleta, antes de devolvê-lo aos rios. Em 2015, a cobertura com coleta de esgoto atendia 67,13% da população paranaense, totalizando 1.859.533 ligações que representam 7.446.428 habitantes (SANEPAR, 2015).

Das 234 ETEs operantes em 2015, 221 possuíam pelo menos um reator anaeróbio como etapa do tratamento de esgoto, dessas 190 possuíam queimador aberto como medida de mitigação de GEE e odores, 28 possuíam etapas de pós-tratamento aeróbias e 131 pós-tratamento anaeróbios.

Quanto ao porte das estações, 13 ETEs atendiam mais 100.000 habitantes. Com relação à capacidade nominal, 31 ETEs podiam tratar mais de 100 L de esgoto por segundo e 38 ETEs tinham capacidade para tratar menos de 10 L·s<sup>-1</sup>. A TABELA 13 sumariza o diagnóstico dos serviços do prestador de serviço de saneamento.

TABELA 13 – DIAGNÓSTICO DAS ETEs DO PRESTADOR DE SERVIÇO DE SANEAMENTO

Sistema de tratamento	ETEs menores que 10L/s	ETEs com capacidade entre 10 e 100L/s	ETEs maiores que 100L/s
UASB	17	42	3
Lodo ativado	1	0	1
UASB + pós-tratamento aeróbio	2	15	11
UASB + pós-tratamento anaeróbio	16	100	15
Lagoa anaeróbia	2	8	1
População atendida	134.258	2.272.354	4.937.840

Considerando o crescimento populacional previsto pelo IPARDES (2012), a soma da população urbana nos municípios que terão atendimento pelo prestador de serviços de saneamento em 2020 será de 9.877.668 habitantes, enquanto em 2025 será de 9.989.082 e 10.099.254 habitantes em 2030.

Baseado nos PMSB, o índice de atendimento médio com rede coletora de esgoto nesses municípios será de 64,8% em 2020, 67,3% em 2025 e 68,9% em 2030, valores que não correspondem à meta de universalização do Plansab.

Na TABELA 14 estão descritas as estruturas previstas em cada ano. O incremento populacional de atendimento em 2020 será de 9,6% em relação à linha de base, em 2025 o aumento será de 12,71% e em 2030 de 14,72%, o que demandará a instalação de novas ETEs. Em 2020 estão previstas 243 ETEs em operação, em 2025 e 2030 serão 258 e 283 plantas, respectivamente.

TABELA 14 – PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS PREVISTAS EM CADA ANO

Ano	População atendida	Número de ETEs em operação	ETEs com reator anaeróbio
2015	7.446.428	234	221
2020	8.161.260	243	227
2025	8.392.502	258	238
2030	8.542.491	283	263

## 4.2 ESTIMATIVA DAS EMISSÕES DE GASES DE EFEITO ESTUFA

O QUADRO 9 apresenta a matriz das emissões de GEE das atividades do prestador de serviços de saneamento identificadas e classificadas pelo tipo de emissão, escopo, categoria e fonte de emissão.

QUADRO 9 – MATRIZ DAS EMISSÕES DE GEE

Tipo de emissão	Escopo	Categoria	Fontes de emissão GEE
Direta	1	Efluentes	Tratamento de efluentes (CH <sub>4</sub> e N <sub>2</sub> O)
		Resíduos Sólidos	Aterros sanitários (CH <sub>4</sub> )
		Combustão Estacionária	Equipamentos estacionários (CO <sub>2</sub> , CH <sub>4</sub> e N <sub>2</sub> O)
		Combustão Móvel	Veículos da frota (CO <sub>2</sub> , CH <sub>4</sub> e N <sub>2</sub> O)
		Emissões Fugitivas	Equipamentos de refrigeração, bebedouros, extintores e ar condicionado (HFCs e CO <sub>2</sub> )
Indireta	2	Compra de eletricidade do Sistema Interligado Nacional (SIN)	Abastecimento de água Esgotamento sanitário Atividades administrativas Aterros Sanitários (CO <sub>2</sub> )
Biomassa	-	Combustão móvel	Veículos da frota (CO <sub>2</sub> , CH <sub>4</sub> e N <sub>2</sub> O)
		Efluentes	Queimadores do tratamento de efluentes (CO <sub>2</sub> )

As atividades desenvolvidas pelo prestador de serviços de saneamento no Estado do Paraná e contempladas nesse estudo são: esgotamento sanitário, abastecimento de água, coleta e disposição final de resíduos sólidos urbanos.

No processo de tratamento de água não foi identificada nenhuma emissão direta de GEE. Não foram consideradas as emissões de reservatórios de abastecimento urbano da companhia por não haver, até o momento, consenso científico internacional sobre metodologia.

Em virtude da importância e do impacto ambiental, a energia é uma emissão indireta calculada em separada das demais e constitui o Escopo 2, as demais emissões indiretas são classificadas como Escopo 3. Para fins deste estudo não

foram contabilizadas as emissões do Escopo 3, sendo a inclusão desta categoria ainda de caráter opcional conforme PBGHGP.

No Escopo 1, como emissões diretas, foram consideradas as emissões provenientes do tratamento de efluentes e da disposição de resíduos sólidos, assim como emissões oriundas de atividades administrativas que dão apoio a esses processos como o consumo de combustível na frota móvel e em equipamentos estacionários como geradores de energia. Além de emissões fugitivas de equipamentos como ar condicionado, refrigeradores, bebedouros e extintores que também são considerados no Escopo 1. Transformadores de energia não foram considerados no estudo, pois em sua maioria estão fora da área da empresa e são gerenciados pela companhia de energia, podendo ser contemplados no Escopo 3 de estudos futuros.

No ano de 2015 o prestador de serviços de saneamento tratou em suas 234 ETEs 324.408.584 m<sup>3</sup> de esgoto. A emissão de metano proveniente dessa atividade foi estimada pela equação (1), p.53, em 40.003,63 t ou 1.000.090,74 tCO<sub>2</sub>e. As emissões de óxido nitroso geradas de maneira direta e indireta pelas ETEs foram estimadas pelas equações (2) e (3), p.54, em 260,72 t, ou 77.694,13 tCO<sub>2</sub>e.

As emissões de metano provenientes das áreas de disposição final de resíduos sólidos urbanos foram estimadas em 44.942,25 tCO<sub>2</sub>e, referente à destinação de 60.201,45 t de resíduos sólidos aterrados nos 3 aterros em 2015 e aos resíduos ainda em decomposição de anos anteriores.

Na TABELA 15 é apresentado o levantamento realizado de equipamentos de combustão móvel e o consumo de combustível nos mesmos. A utilização dos veículos da frota do prestador de serviços de saneamento foi responsável pelo consumo de 2.321.231,13 L de gasolina, 514.753,46 L de etanol, 1.023.414,04 L de diesel e 12.058,21 m<sup>3</sup> de GLP, o que representou uma emissão de 6.504,07 tCO<sub>2</sub>e, conforme fatores de emissão da TABELA 2, p.69. A queima de biomassa resultou em 1.866,71 t de emissões biogênicas.



TABELA 15 – LEVANTAMENTO DE EQUIPAMENTOS DE COMBUSTÃO MÓVEL

<b>Tipo de equipamento</b>	<b>Quantidade de unidades</b>	<b>Consumo de óleo diesel [L]</b>	<b>Consumo de gasolina [L]</b>	<b>Consumo de etanol [L]</b>	<b>Consumo de GLP [m<sup>3</sup>]</b>
Caminhão	228	662.648,2	-	-	-
Hidrojato	109	116.462,25	328,77	-	-
Maquinário	12	-	-	-	12.058,21
Moto	291	-	49.720,45	746,26	-
Reboque	4	514,85	387,8	-	-
Veículo leve	2201	243.788,74	2.270.794,11	514.007,2	-
<b>TOTAL</b>	<b>2854</b>	<b>1.023.414,04</b>	<b>2.321.231,13</b>	<b>514.753,46</b>	<b>12.058,21</b>

A queima de combustíveis em equipamentos estacionários como conjunto motogerador também é considerada como fonte direta de emissões de GEE. Segundo os dados operacionais de cada regional, foram consumidos 5.639 L de óleo diesel, responsáveis pela emissão de 13,89 tCO<sub>2</sub>e.

Na TABELA 16 é exibido o levantamento realizado dos equipamentos de emissões fugitivas, as emissões de GEE referentes ao uso dessas unidades foram estimadas em 15.185,5 tCO<sub>2</sub>e.

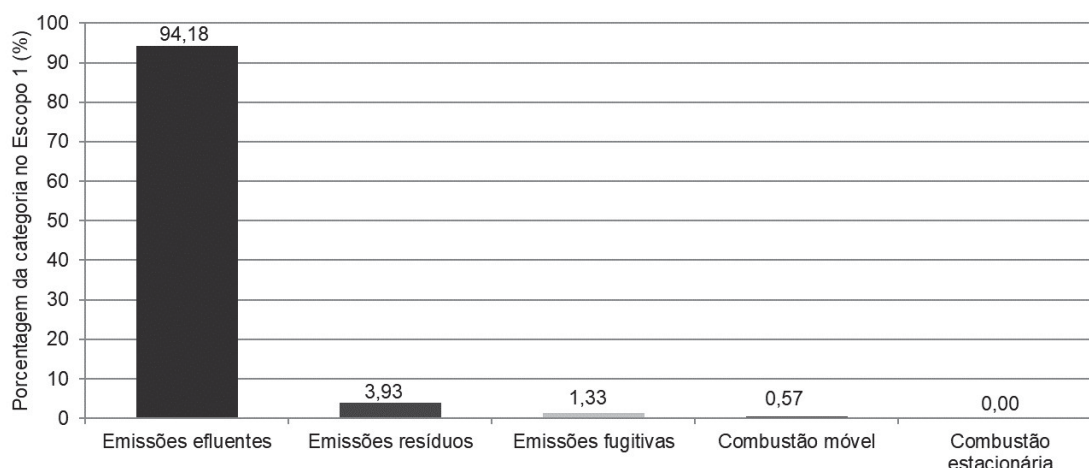
TABELA 16 – LEVANTAMENTO DE EQUIPAMENTOS DE EMISSÃO FUGITIVA

<b>Tipo de equipamento</b>	<b>Gás refrigerante</b>	<b>Unidades novas</b>	<b>Unidades em operação</b>	<b>Unidades dispensadas</b>
Refrigeradores residenciais	HFC-134a	21	316	13
Ar condicionado residencial/comercial	R-410a	181	632	28
Bebedouro comercial	HFC-134a	5	505	12

As emissões biogênicas do prestador de serviços de saneamento correspondem à queima de biocombustíveis na frota da companhia e ao metano evitado pelos queimadores e lançado em forma de CO<sub>2</sub>, em 2015 foram emitidas 228.764,58 tCO<sub>2</sub>e.

O GRÁFICO 1 representa as emissões diretas por categoria.

GRÁFICO 1 – EMISSÃO DIRETA DE GEE POR ATIVIDADE EM 2015



FONTE: o autor, 2017.

Como já era esperada, a atividade do prestador de serviços de saneamento que mais emite GEE, é o tratamento de efluentes responsável por 94,18% das emissões diretas, enquanto as demais fontes somam 5,81% das emissões diretas da companhia.

É importante mencionar que a estimativa de emissões poderia ser maior se fossem usados os valores de GWP mais atualizados, porém como premissa de cálculo manteve-se o valor do quarto relatório do IPCC utilizado pela ferramenta do *GHG Protocol*.

A TABELA 17 apresenta as emissões de 13 ETEs, as quais em 2015 possuíam mais de 100.000 habitantes, e que correspondem a 50,33% das emissões provenientes do tratamento de efluentes. É possível verificar que as emissões são proporcionais à população atendida, tendo uma pequena variação devido ao tipo de tratamento de cada ETE. Isso ocorre devido à eficiência e ao fator médio de conversão de  $\text{CH}_4$  de cada etapa do tratamento. Sistemas compostos por etapas anaeróbias como reator, lagoas e filtros anaeróbios tendem a emitir mais que etapas aeróbias como filtro biológico aeróbio, flotação, pois o MCF nas etapas anaeróbias é 0,8, enquanto nas etapas aeróbias é 0,3, considerando premissas conservadoras de operação. Essa situação é possível perceber comparando as emissões das ETEs D e F que atendem aproximadamente o mesmo número de habitantes, porém variam as emissões inversamente proporcionais ao número de habitantes.

TABELA 17 – CLASSIFICAÇÃO DAS ETES COM RELAÇÃO ÀS EMISSÕES DE GEE

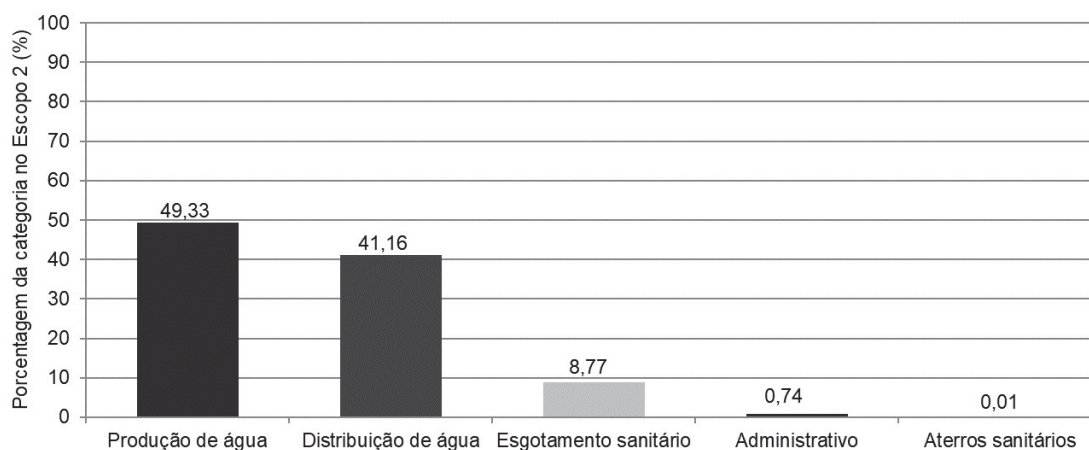
ETE	População atendida	Tipo de Tratamento	Emissões CH <sub>4</sub> + N <sub>2</sub> O [tCO <sub>2</sub> e]	Emissões percapita [tCO <sub>2</sub> e·hab <sup>-1</sup> ]	% acumulada em relação ao total
A	719.273	UASB + FAD	101.616,70		9,34
B	425.681	UASB + lagoa	76.751,44		16,55
C	805.827	AERPR	68.905,83		22,94
D	253.472	UASB + lagoa	46.200,87		27,23
E	266.713	UASB + FBA	40.292,09		30,97
F	256.854	UASB + FAD	36.829,85		34,39
G	186.225	UASB + lagoa	34.217,32		37,56
H	115.693	LA + LF	28.360,89		40,19
I	184.132	UASB + FBA	26.466,64		42,65
J	132.621	UASB + FBA	24.935,86		44,96
K	120.564	UASB	20.387,69		46,85
L	131.094	UASB + FBA	18.862,25		48,60
M	148.696	UASB	18.603,28		50,33

UASB: reator anaeróbio, FAD: flotação, AERPR: lodo ativado com aeração prolongada, FBA: filtro biológico aeróbio, LA: lagoa anaeróbia, LF: lagoa facultativa, FAN: filtro anaeróbio.

Segundo dados do sistema de gerenciamento de faturas de energia elétrica do prestador de serviços de saneamento, em 2015 foram consumidos 676.602,99 MWh nos sistemas de abastecimento de água, esgotamento sanitário e processos administrativos.

Segundo informações operacionais, nos aterros de Apucarana e Cianorte foram consumidos 57,16 MWh. Desta forma, as emissões decorrentes do consumo de energia elétrica nas atividades do prestador de serviços de saneamento em 2015, foram de 84.230,13 tCO<sub>2</sub>e. O GRÁFICO 2 representa as emissões indiretas por atividade.

GRÁFICO 2 – EMISSÃO INDIRETA DE GEE POR ATIVIDADE EM 2015



FONTE: o autor, 2017.

Analisando as emissões do GRÁFICO 2, observa-se que os processos de produção e distribuição de água são responsáveis por mais de 90% das emissões indiretas do prestador de serviço. Esse resultado reflete a realidade do sistema de distribuição de água que é composto por diversos equipamentos para elevar a água para pontos mais altos, enquanto o sistema de coleta de esgoto tende a acompanhar a cota do terreno utilizando a força da gravidade a seu favor para transporte do efluente.

As fontes de emissão mapeadas foram responsáveis pela emissão direta de 1.144.435,59 tCO<sub>2</sub>e, 84.230,13 tCO<sub>2</sub>e de emissões indireta e 228.764,58 tCO<sub>2</sub>e de emissões biogênicas em 2015, divididos por escopo e por atividade.

#### 4.3 CENÁRIOS DE MITIGAÇÃO DE EMISSÕES DE GASES DE EFEITO ESTUFA

Como o tratamento de efluentes representa mais de 90% das emissões diretas, foram elaborados cenários de mitigação apenas para essa categoria.

Na TABELA 18 são apresentados os equipamentos necessários para a mitigação de emissões de GEE em cada cenário. Somente os cenários V, VI e VII estão previstos a instalação de equipamentos para geração de energia elétrica.

TABELA 18 – NÚMERO DE EQUIPAMENTOS EM CADA CENÁRIO DE MITIGAÇÃO

Ano	Cenário	ETEs com queimador aberto	ETEs com queimador enclausurado	ETEs com aproveitamento energético	ETEs sem reator anaeróbio
2015		190	-	-	13
	LB	227	-	-	16
2020	II	-	227	-	16
	III	213	14	-	16
	IV	194	-	33	16
	V	209	-	18	16
	VI	-	209	18	16
	VII	210	-	1	32
2025	LB	237	-	-	21
	II	-	237	-	21
	III	223	14	-	21
	IV	206	-	31	21
	V	220	-	17	21
	VI	-	220	17	21
	VII	193	-	1	64

Ano	Cenário	ETEs com queimador aberto	ETEs com queimador enclausurado	ETEs com aproveitamento energético	ETEs sem reator anaeróbio
2030	LB	262	-	-	21
	II	-	262	-	21
	III	248	14	-	21
	IV	231	-	31	21
	V	245	-	17	21
	VI	-	245	17	21
	VII	182	-	1	100

Em 2020 estão previstas 243 ETEs para atender o crescimento populacional esperado, sendo que no cenário LB as 227 ETEs com reator anaeróbio teriam queimadores abertos e 16 ETEs possuem sistemas de tratamento sem reator anaeróbio. Em 2025, das 258 ETEs previstas, 237 teriam queimadores abertos como solução de mitigação de emissões de GEE no cenário LB. Já em 2030, 262 ETEs possuem reator anaeróbio na concepção do sistema de tratamento no cenário LB e 21 ETEs não possuem.

Na TABELA 19 são apresentados os resultados das simulações de cálculo de emissões realizadas para cada cenário de mitigação de emissões de GEE proposto.

TABELA 19 – RESULTADOS DOS CENÁRIOS DE MITIGAÇÃO DE EMISSÕES DE GEE

1	2	3	4	5	6	7	8
Ano	Cenário	CH <sub>4</sub> evitado (tCO <sub>2</sub> e)	Emissões líquidas de CH <sub>4</sub> (tCO <sub>2</sub> e)	Incremento de emissões de CH <sub>4</sub> com relação LB (%)	Emissões de N <sub>2</sub> O (tCO <sub>2</sub> e)	Emissões totais CH <sub>4</sub> +N <sub>2</sub> O (tCO <sub>2</sub> e)	Incremento de emissões com relação LB (%)
2015	LB	226.896,94	1.000.090,74	-	77.694,13	1.077.784,88	-
	II	305.293,80	1.106.824,91	-	90.534,65	1.197.359,56	-
	III	602.192,64	809.926,07	-26,82	90.534,65	900.460,71	-24,80
	IV	452.185,66	959.712,89	-13,29	90.534,65	1.050.247,54	-12,29
	V	421.935,00	989.963,56	-10,56	90.534,65	1.080.498,20	-9,76
	VI	407.729,08	965.633,77	-12,76	90.534,65	1.056.168,42	-11,79
	VII	552.103,81	813.057,40	-26,54	90.534,65	903.592,05	-24,53
2020	LB	155.240,00	891.057,87	-19,49	48.722,14	939.780,01	-21,51
	II	302.728,25	1.124.769,84	-	87.534,96	1.213.554,12	-
	III	599.401,94	828.096,15	-26,38	87.534,96	916.880,43	-24,45
	IV	458.002,66	969.495,43	-13,80	87.534,96	1.058.279,71	-12,80
	V	421.793,71	1.005.704,39	-10,59	87.534,96	1.094.488,67	-9,81
	VI	402.363,26	971.365,07	-13,64	87.534,96	1.060.149,35	-12,64
	VII	536.299,76	828.761,61	-26,32	87.534,96	917.545,89	-24,39
2030	LB	128.798,35	878.848,71	-21,86	37.257,48	921.157,62	-24,09
	II	311.583,79	1.149.977,82	-	90.096,08	1.241.336,89	-
	III	616.935,91	844.625,70	-26,55	90.096,08	935.984,77	-24,60
	IV	470.912,84	990.648,77	-13,85	90.096,08	1.082.007,84	-12,84
	V	433.668,22	1.027.893,39	-10,62	90.096,08	1.119.252,46	-9,83
	VI	413.863,54	993.195,30	-13,63	90.096,08	1.084.554,37	-12,63
	VII	552.158,73	847.155,13	-26,33	90.096,08	938.514,20	-24,39
		118.944,41	886.649,62	-22,90	35.501,84	927.521,14	-25,28

Os resultados da coluna 3 foram obtidos pela equação (9) p.74; as emissões líquidas, mostradas na coluna 4 são resultado da diferença entre os valores obtidos pela equação (1) p.53 e a coluna 3; a coluna 5 é calculada equação (10) p. 78 considerando a LB de cada ano, a coluna 6 é o resultado da soma dos resultados das equações (2) e (3) p.54, a coluna 7 é o resultado da soma das emissões da coluna 4 e 6, a coluna 8 é calculada equação (10) p. 78 considerando a LB de cada ano.

As emissões totais de CH<sub>4</sub> + N<sub>2</sub>O nos cenários “linha de base” construídos para cada ano serão: 1.197.359,56 tCO<sub>2</sub>e, em 2020; 1.213.554,12 tCO<sub>2</sub>e, em 2025; 1.241.336,89 tCO<sub>2</sub>e, em 2030. Assim, com o crescimento populacional previsto e a adoção de tecnologia de baixa eficiência, haverá um aumento gradual das emissões de GEE acima dos valores encontrados em 2015.

Os GRÁFICOS 3, 4 e 5 apresentam não apenas as emissões líquidas de cada cenário como também as emissões evitadas devido às medidas adotadas e a eficiência de remoção de carga devido à mudança na concepção do sistema de tratamento de algumas ETEs.

As emissões líquidas foram calculadas pela diferença entre as emissões totais previstas e as emissões evitadas pela adoção de solução para mitigação de GEE.

GRÁFICO 3 – EMISSÕES TOTAIS PREVISTAS EM 2020 PARA CADA CENÁRIO

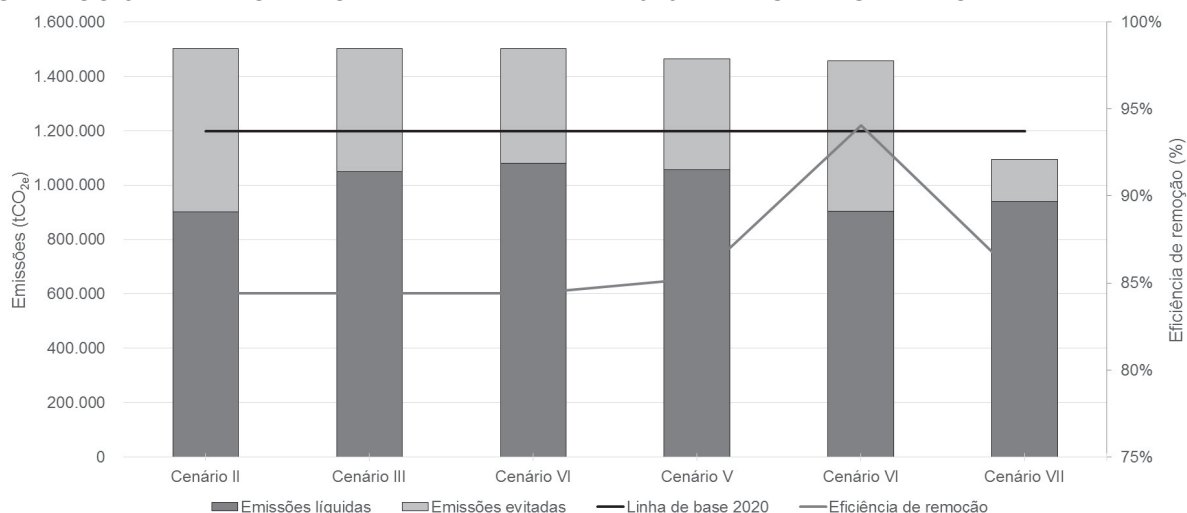


GRÁFICO 4 – EMISSÕES TOTAIS PREVISTAS EM 2025 PARA CADA CENÁRIO

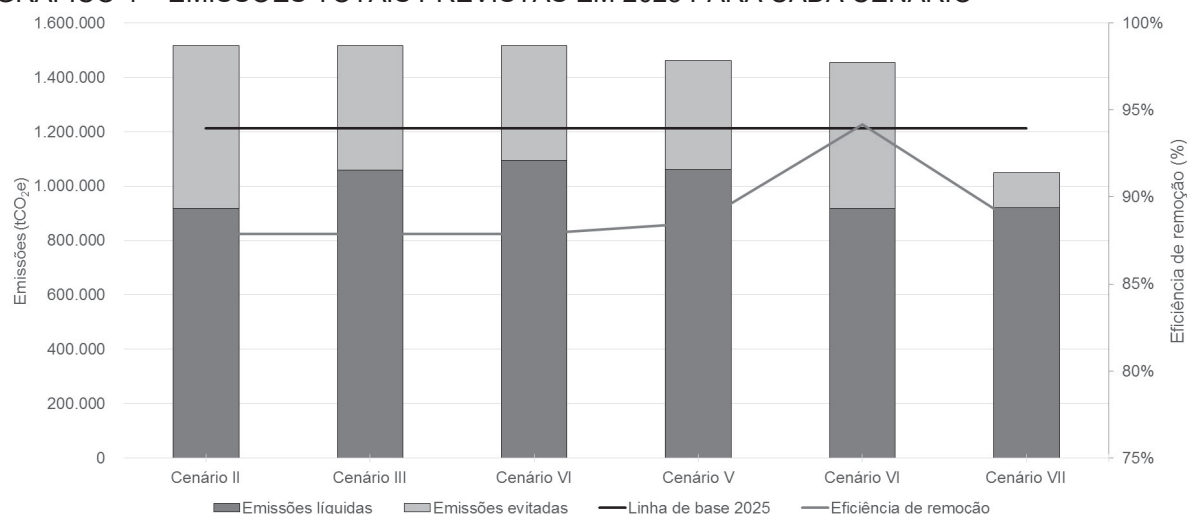
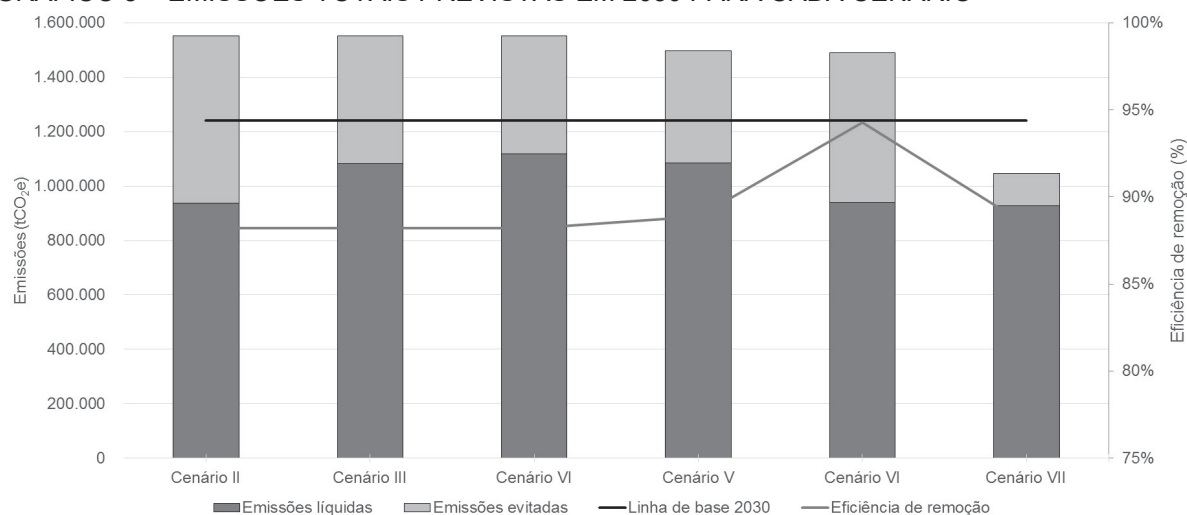


GRÁFICO 5 – EMISSÕES TOTAIS PREVISTAS EM 2030 PARA CADA CENÁRIO



No cenário II, preveem-se as seguintes emissões: 900.460,71 tCO<sub>2</sub>e, em 2020; 916.880,43 tCO<sub>2</sub>e, em 2025; 935.984,77 tCO<sub>2</sub>e, em 2030. Observa-se que em todos os anos avaliados, devido à instalação de queimadores enclausurados de alta eficiência em todas as ETEs, haveria redução nas emissões de GEE.

Já no cenário III, a previsão é de que ao longo do tempo haja as seguintes emissões: 1.050.247,54 tCO<sub>2</sub>e, em 2020; 1.058.279,71 tCO<sub>2</sub>e, em 2025; 1.082.007,84 tCO<sub>2</sub>e, em 2030. Percebe-se que as emissões não ultrapassam em nenhum momento a linha de base, mesmo com a instalação de queimadores enclausurados apenas nas estações maiores.

No cenário IV, o qual se pretende instalar equipamentos para aproveitamento energético nas ETEs maiores, por sua vez, encontraram-se os seguintes valores:



1.080.498,20 tCO<sub>2</sub>e, em 2020; 1.094.488,67 tCO<sub>2</sub>e, em 2025; 1.119.252,46 tCO<sub>2</sub>e, em 2030. Em todos os anos os valores ficariam abaixo daquele estimado para a linha de base.

Com a implantação de pós-tratamento aeróbio e aproveitamento energético do biogás nas ETEs maiores, o cenário V apresenta os seguintes valores de emissões de GEE: 1.056.168,42 tCO<sub>2</sub>e, em 2020; 1.060.149,35 tCO<sub>2</sub>e, em 2025; 1.084.554,37 tCO<sub>2</sub>e, em 2030. Nesse caso, os valores encontrados para as emissões de 2020, 2025 e 2030 também ficariam abaixo daquelas encontradas na linha de base.

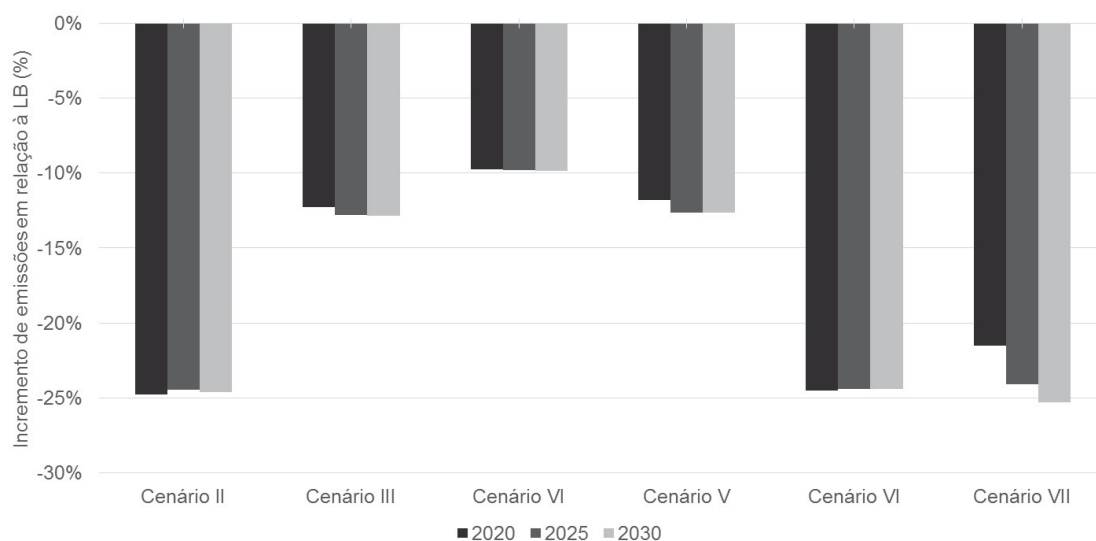
No cenário VI, com a implantação de pós-tratamento em todas as ETEs, prevê-se os seguintes valores de emissões de GEE: 903.592,05 tCO<sub>2</sub>e, em 2020; 917.545,89 tCO<sub>2</sub>e, em 2025; 938.514,20 tCO<sub>2</sub>e, em 2030. Nesse caso, os valores encontrados ao longo dos anos também ficaram abaixo daqueles encontrados na linha de base. No entanto, as emissões são ligeiramente maiores que aquelas simuladas para o cenário II.

Por fim, no cenário VII, com a desativação da etapa anaeróbia das ETEs maiores e adoção de sistemas aeróbios nas novas ETEs, prevê-se os seguintes valores de emissões de GEE: 939.780,01 tCO<sub>2</sub>e, em 2020; 921.157,62 tCO<sub>2</sub>e, em 2025; 927.521,14 tCO<sub>2</sub>e, em 2030. Esse cenário não mantém o padrão dos demais de crescimento ao longo dos anos, pois entre 2020, 2025 e 2030 muda drasticamente a quantidade de plantas com sistemas aeróbios por inteiro.

A eficiência de remoção da carga orgânica se mantém constante entre a linha de base, cenários II, III e IV, pois não há mudança na concepção do sistema de tratamento, com valores iguais a 84,41; 87,86 e 88,22 para os anos de 2020, 2025 e 2030 respectivamente. O cenário V apresenta um leve incremento na eficiência de tratamento, com valores iguais a 85,26; 88,51 e 88,88%. Já o cenário VI é a situação que apresenta os melhores resultados para a remoção de matéria orgânica, atingindo 94,05; 94,18 e 94,28%. O cenário VII apresenta valores muito próximos do cenário V, como 84,95; 88,13 e 88,38%.

Das opções de concepção de sistema de tratamento consideradas, o reator anaeróbio seguido por uma etapa de pós-tratamento aeróbia apresentou a melhor eficiência para remoção de carga orgânica conforme valores previstos em Von Sperling (2005).

GRÁFICO 6 – REDUÇÃO DAS EMISSÕES PREVISTAS EM 2020, 2025 E 2030 EM RELAÇÃO À LINHA DE BASE DE CADA ANO



O GRÁFICO 6 apresenta a redução das emissões de GEE calculadas em cada cenário, comparadas com a linha de base, em porcentagem. No cenário II, ocorrem reduções de 24,80; 24,45 e 24,6%. No cenário III, por sua vez, a diferença foi de 12,29; 12,8; 12,84%. Já no cenário IV a redução das emissões foi de 9,76; 9,81 e 9,83%. No cenário V, a redução foi de 11,79; 12,64 e 12,63%. No cenário VI, houve redução de 24,53; 24,39 e 24,39%. Finalmente, no cenário VII as reduções foram de 21,51; 24,09 e 25,28% para cada um dos anos analisados.

É possível verificar que os cenários II e IV foram aqueles que apresentaram os melhores resultados, no primeiro devido à eficiência de conversão dos equipamentos considerados, no segundo além do emprego de tecnologias para geração de energia nas ETEs maiores, há previsão de implantação de pós-tratamento aeróbio em todas as estações. No cenário VII, apesar das reduções ficarem ligeiramente abaixo dos cenários II e VI, em todos os anos a redução ultrapassou 20% em relação à linha de base. Os cenários III e IV apesar da redução ficar em torno de 10% ao longo dos anos, tendem a ser cenários mais realistas em termos de investimentos, tendo em vista que são consideradas instalações de equipamentos apenas nas ETEs maiores. Por fim no cenário V, além da redução de emissões em torno de 12% em relação à LB, há mudança na concepção do sistema e tratamento e ainda há a possibilidade de gerar energia a partir da recuperação do biogás.

Assim como mostra os levantamentos do programa do Probiogás (BRASIL, 2015a), os cenários propostos prevêem o emprego de tecnologias ainda incipiente entre os prestadores de serviços de saneamento no Brasil.

#### 4.3.1 Investimentos necessários para cada cenário

Como os cenários prevêem mitigação apenas de metano, os custos de investimento foram levantados apenas das ETEs que possuem reator anaeróbio na concepção de tratamento, as demais foram retiradas da análise, são 16 ETEs nos cenários de 2020 e 21 ETEs em 2025 e 2030. Como premissa de cálculo, foi considerada a população atendida estimada de 2030 para dimensionamento dos equipamentos.

Na TABELA 20 são apresentados os valores de produção de biogás e potencial energético utilizados nos cálculos dos sistemas de aproveitamento energético do biogás nas 17 ETEs com população atendida maiores que 100.000 habitantes previstas no ano de 2030.

Os resultados dos cálculos de produção de biogás obtidos são próximos da estimativa de produção encontrada por Santos (2017).

TABELA 20 – POTENCIAL ENERGÉTICO DAS ETEs EM 2030

ETE	Emissões CH <sub>4</sub> em 2015 <sup>1</sup> (tCO <sub>2</sub> e)	População Prevista em 2030	Produção de biogás <sup>2</sup> (m <sup>3</sup> ·d <sup>-1</sup> )	Potencial químico <sup>3</sup> (kWh·h <sup>-1</sup> )
A	26.902	136.953	1.917,34	556,99
B	16.620	105.391	1.475,47	428,62
C	9.538	103.491	1.448,87	420,90
D	17.209	164.436	2.302,10	668,76
E	16.728	198.825	2.783,55	808,62
F	23.264	177.331	2.482,63	721,20
G	18.867	161.210	2.256,94	655,64
H	31.869	223.955	3.135,37	910,82
I	16.189	116.174	1.626,44	472,48
J	1.512	106.343	1.488,80	432,50
K	43.005	281.666	3.943,32	1.145,53
L	92.547	749.356	10.490,98	3.047,63
M	71.384	730.191	10.222,68	2.969,69
N	68.137	839.529	11.753,41	3.414,36

ETE	Emissões CH <sub>4</sub> em 2015 <sup>1</sup> (tCO <sub>2</sub> e)	População Prevista em 2030	Produção de biogás <sup>2</sup> (m <sup>3</sup> ·d <sup>-1</sup> )	Potencial químico <sup>3</sup> (kWh·h <sup>-1</sup> )
O	11.917	118.909	1.664,72	483,60
P	36.929	315.167	4.412,34	1.281,78
Q	24.145	248.573	3.480,02	1.010,95

1: Emissões calculadas conforme item 2.4.2.1.; 2: Para aproveitamento energético foi considerado 0,014 m<sup>3</sup>·hab<sup>-1</sup>·d<sup>-1</sup> (VALENTE, 2015); 3: Baseado no poder calorífico do biogás, foi considerado 9,96 kWh·m<sup>-3</sup> (LOBATO, 2011), conforme equação 11.

Em 146 ETES não será necessário investimento de queimadores abertos previstos na linha de base e nos cenários III, IV e V por já possuírem esse equipamento em 2015.

As informações da TABELA 21 foram utilizadas para dimensionar os sistemas de queima e aproveitamento do biogás e juntamente com os valores de custo apresentados no item 3.3.1, foi calculado o valor para implantação, operação e manutenção dos cenários previstos. O investimento previsto nos 20 anos considerados para todas as ETES com reator anaeróbio está apresentado na tabela a seguir.

TABELA 21 – CUSTO DE INVESTIMENTO POR CENÁRIO EM R\$

	Investimento total (R\$)	Custo anual por tCO <sub>2</sub> e evitada (R\$)
LB 2030	10.510.680,93	-
Cenário II	187.247.255,29	30,66
Cenário III	14.633.277,97	4,59
Cenário IV	-125.515.274,64	-51,41
Cenário V	678.399.418,06	216,35
Cenário VI	1.425.278.314,91	235,33
Cenários VII	984.165.811,75	156,81

Cálculos baseados nos custos das Tabelas 8 a 12, p.79 a 81 aplicados nas equações 11 e 12, p.81.

Pela TABELA 21 é possível verificar que o valor trazido para o presente do investimento necessário para implantar o cenário VI é o mais alto, pois além dos equipamentos para gestão do biogás, estão previstas melhorias no sistema de tratamento de efluentes. Nos cenários IV, V e VI além da despesa prevista para a implantação dos equipamentos, foi considerada a receita com a compensação da energia, conforme previsto na Resolução ANA nº 482/2012. O custo do cenário IV é negativo, pois as despesas são menores que as receitas anuais oriundas da compensação da energia gerada na rede, gerando R\$ 125.515.274,64 ao longo dos

20 anos considerados de vida útil dos equipamentos. No cenário VII, não foram considerados os custos em relação à desativação das etapas anaeróbias por falta de informações a respeito, por isso o custo de implantação desse cenário tende a ser maior do que o valor apresentado.

Além disso, por meio da TABELA 21 é possível analisar os custos anuais por tonelada de emissões de GEE evitada em relação ao cenário LB. E os cenários que apresentaram melhores resultados são os cenários IV, III e II.

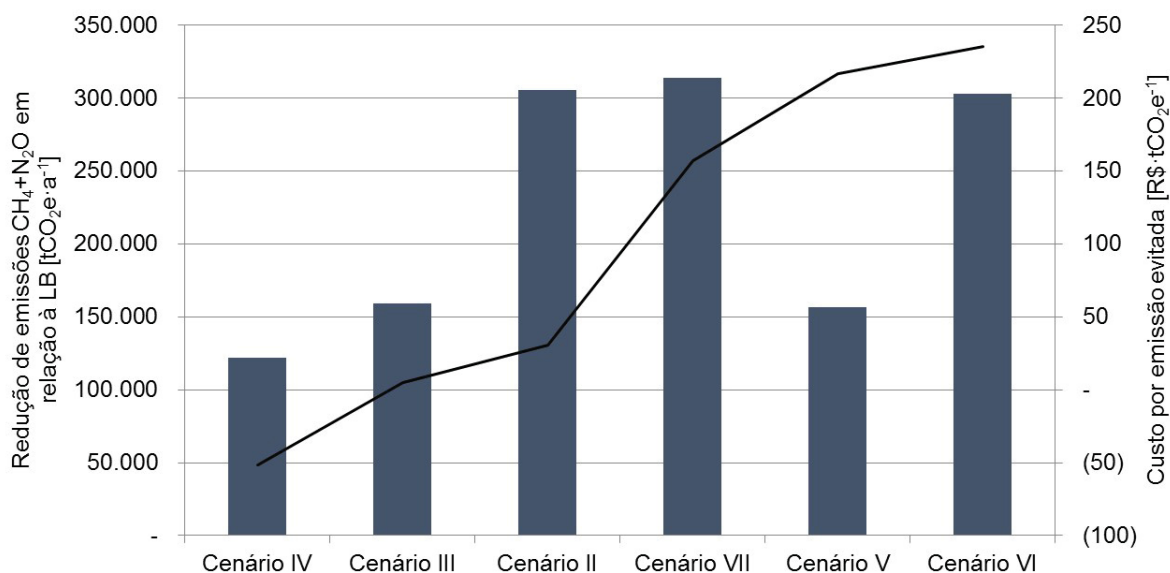
#### 4.3.2 Análise dos cenários de mitigação

Para analisar os cenários de mitigação de GEE procurou-se identificar o custo anual para reduzir uma tonelada de CO<sub>2</sub> equivalente de cada cenário proposto conforme TABELA 21.

Para reduzir uma tonelada de CO<sub>2</sub>e no cenário II são necessários R\$ 30,66 de investimento anual, já no cenário III seria necessário investir R\$ 4,59 anualmente. No cenário IV, haveria um retorno financeiro de R\$ 51,41 ao ano. Para a implantação do cenário V, R\$ 216,35·a<sup>-1</sup> seriam gastos para cada tonelada de CO<sub>2</sub>e reduzida, já no cenário VI R\$ 235,33·a<sup>-1</sup> seriam necessários. Por fim, no cenário VII, R\$ 186,86 seriam gastos anualmente para redução de cada tonelada de CO<sub>2</sub>e.

Essa análise de custo por tonelada de CO<sub>2</sub> evitada é ilustrada no GRÁFICO 7 em ordem crescente.

GRÁFICO 7 – REDUÇÃO DE EMISSÕES E CUSTO POR TCO<sub>2</sub> EVITADA POR CENÁRIO PROPOSTO



Porém, além do custo, vale analisar a pegada de metano e o indicador de intensidade carbônica de cada cenário. A pegada de metano para a linha de base é de  $2,42 \text{ kgCO}_2\text{e}\cdot\text{m}^{-3}$ .

No cenário II são emitidos  $1,74 \text{ kgCO}_2\text{e}$  para cada  $\text{m}^3$  de esgoto tratado, enquanto no cenário III o valor da pegada é  $2,20 \text{ kgCO}_2\text{e}\cdot\text{m}^{-3}$ . No cenário IV, para tratar  $1\text{m}^3$  de esgoto  $2,32 \text{ kgCO}_2\text{e}$  seriam emitidos em 2030, enquanto no cenário V e VI seriam emitidos  $2,38$  e  $1,67 \text{ kgCO}_2\text{e}\cdot\text{m}^{-3}$  respectivamente. Por fim, no cenário VII, o valor do indicador é de  $2,18 \text{ kgCO}_2\text{e}\cdot\text{m}^{-3}$ . Sendo assim, os cenários que apresentaram menores pegadas de metano são os cenários VI e II.

Com relação ao indicador de intensidade carbônica, todos os cenários apresentaram valores abaixo da linha de base,  $0,154 \text{ tCO}_2\text{e}\cdot\text{hab}^{-1}$ . Os cenários III, VI e V apresentaram o mesmo valor  $0,151 \text{ tCO}_2\text{e}\cdot\text{hab}^{-1}$ , enquanto os cenários VII, II e VI apontaram uma intensidade carbônica de  $0,137$ ;  $0,114$  e  $0,110 \text{ tCO}_2\text{e}\cdot\text{hab}^{-1}$  respectivamente.

Com relação ao custo por tonelada de  $\text{CO}_2$  evitada, o cenário IV é o mais favorável devido à receita proporcionada, seguido dos cenários III e II. Considerando essas três variáveis, pode-se concluir que o cenário II além de ter uma pegada de metano baixa para tratar  $1 \text{ m}^3$  de esgoto, baixo intensidade carbônica, ainda apresenta um dos menores custos para implantação.

Carvalho (2016) simulou 7 cenários de mitigação de emissões que resultaram em uma intensidade carbônica entre  $0,11$  e  $0,67 \text{ tCO}_2\text{e}\cdot\text{hab}^{-1}$ . Sendo que o cenário que apresentou a maior redução na intensidade carbônica por habitante, é o cenário decorrente da implementação de equipamentos com alto poder de destruição de GEE em todas as estações, como os queimadores enclausurados.

Porém, os padrões de lançamento para efluentes em corpos hídricos tendem a ficar cada vez mais restritos e os cenário II, III e IV não preveem melhoria no tratamento. Em 2030, a média de remoção de carga orgânica prevista nos cenários II, III, IV e V é de  $88\%$ , assim como no cenário VII, apesar de considerar lodo ativado convencional na maioria das ETEs. O cenário VI prevê pós-tratamento em todas as ETEs atingindo uma eficiência média de  $94,28\%$ . Sendo assim, além de reduzir as emissões de GEE, evitaria que  $10.106$  toneladas de DBO fossem para os rios diariamente, em comparação com os demais cenários.

Com o intuito de analisar cada cenário de mitigação proposto, foram elaboradas curvas de custo marginais de abatimento, apresentadas nos GRÁFICOS 8 ao 14.

GRÁFICO 8 – CUSTO MARGINAL DE ABATIMENTO POR ETE DO CENÁRIO II

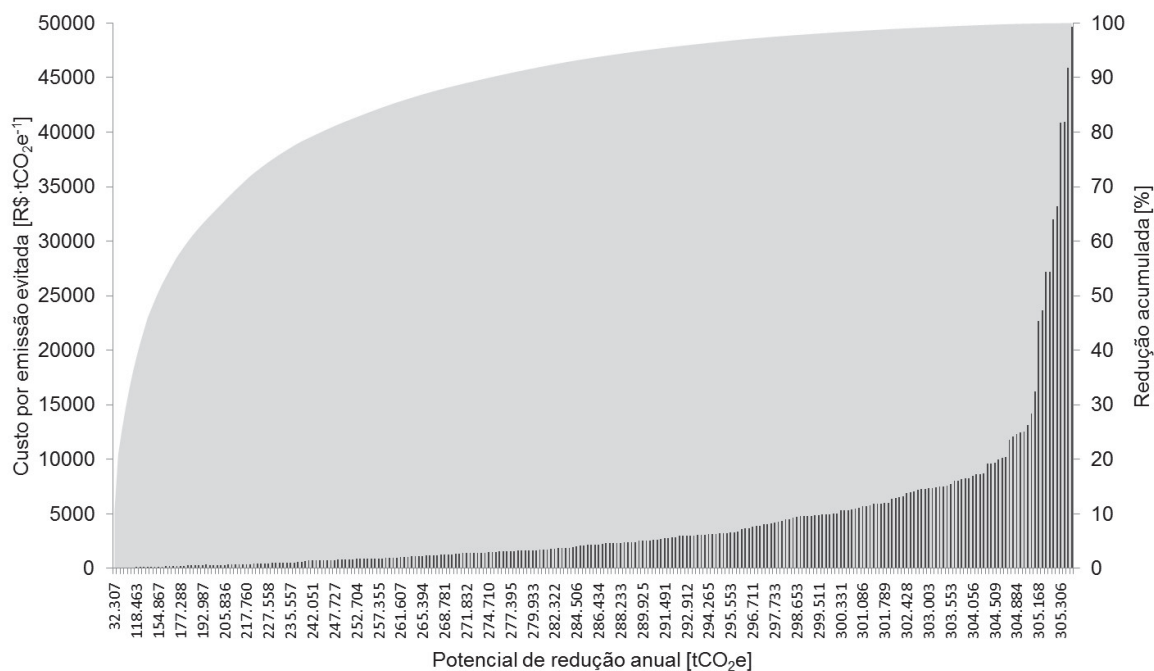
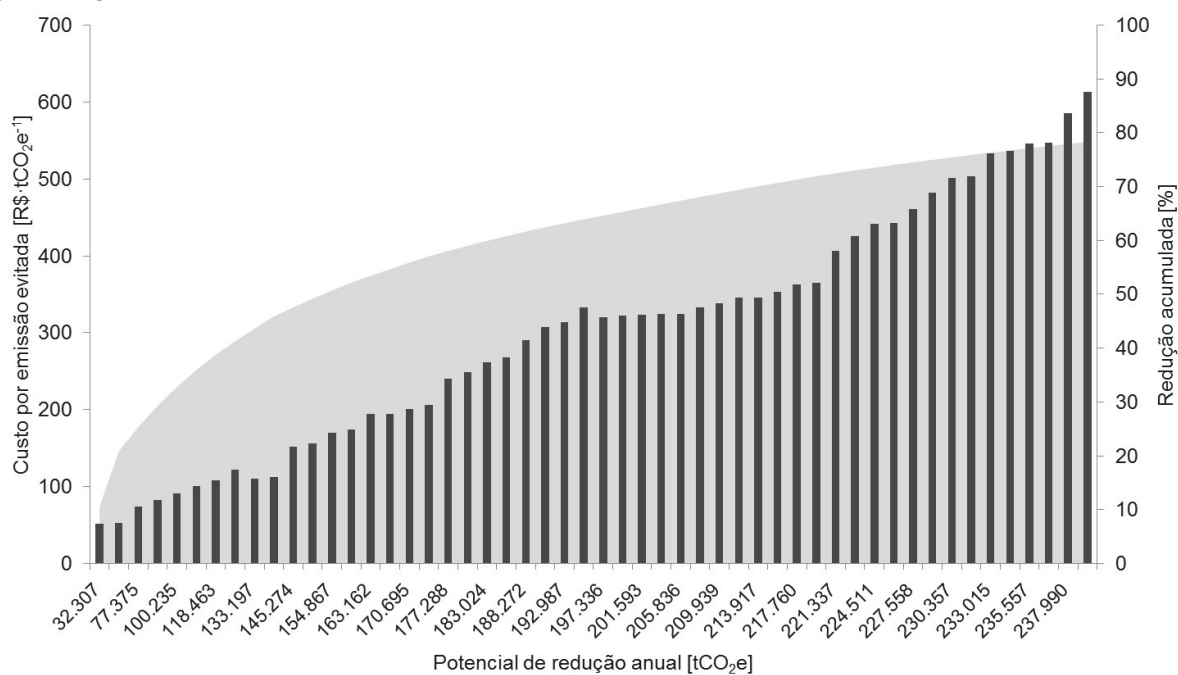
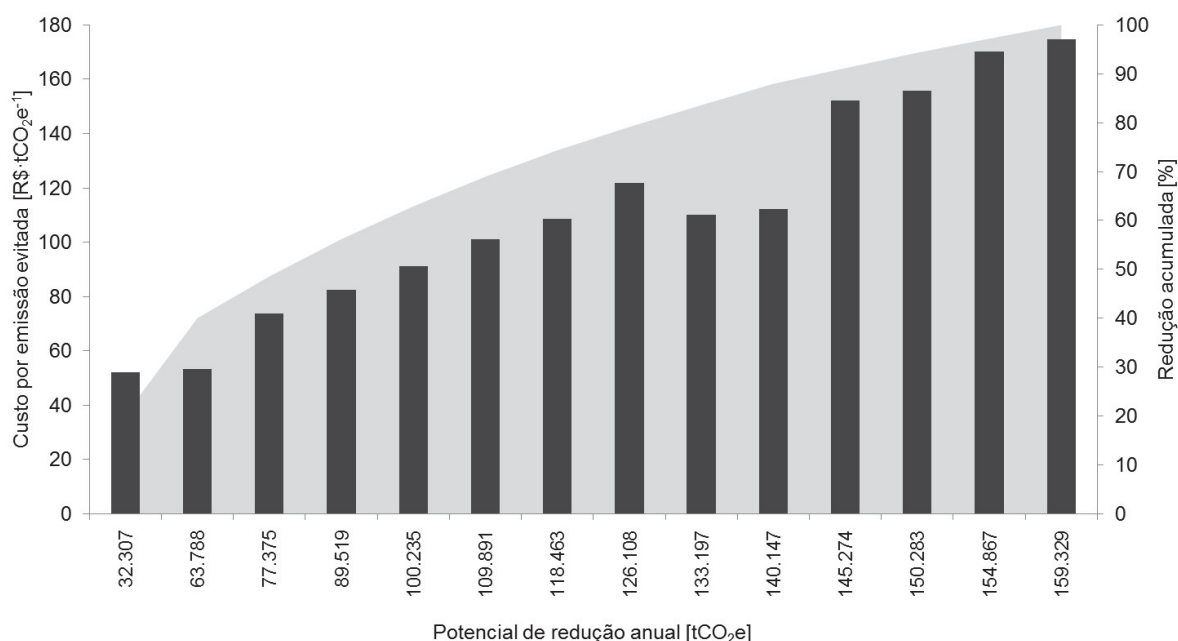


GRÁFICO 9 – DETALHES DA CURVA DE CUSTO MARGINAL DE ABATIMENTO POR ETE DO CENÁRIO II



Para implantar o cenário II, o custo por emissão evitada ao longo dos 20 anos seriam R\$ 613,20·tCO<sub>2</sub>e<sup>-1</sup>. O GRÁFICO 9 apresenta o detalhe da curva de abatimento do cenário II mostrando as 52 ETEs que apresentaram custos menores que o custo de implantação do cenário II como um todo. Além disso, a implantação de queimadores enclausurados nessas ETEs reduziria 78,31% das emissões e seria necessário 21,66% do investimento previsto no cenário, isso ocorre, pois as maiores reduções ocorrem nas ETEs maiores, fato que remete ao cenário III.

GRÁFICO 10 – CUSTO MARGINAL DE ABATIMENTO POR ETE DO CENÁRIO III

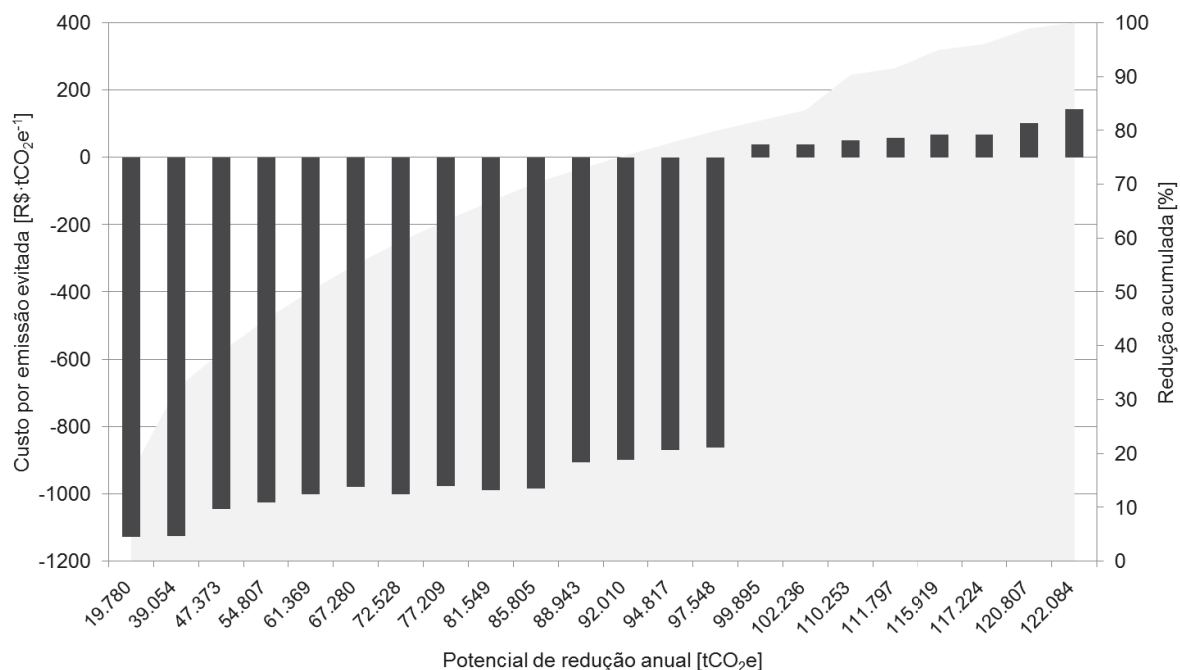


Para implantar o cenário II, o custo por emissão evitada ao longo dos 20 anos seriam R\$ 91,80·tCO<sub>2</sub>e<sup>-1</sup>. A curva de abatimento do cenário III, permite verificar que 5 ETEs precisariam de investimentos menores custo por emissão evitada do cenário III como um todo.

Por meio do GRÁFICO 10 também é possível verificar que para atingir 100% da redução prevista no cenário seria necessário instalar queimadores em apenas 15 ETES, as demais ETEs teriam queimadores abertos já previstos na LB. Sendo assim, pode-se sugerir que o cenário III seja implantado como uma etapa do cenário II.



GRÁFICO 11 – CUSTO MARGINAL DE ABATIMENTO POR ETE DO CENÁRIO IV



A curva de abatimento do cenário IV permite observar que 14 ETEs geram mais receitas que custos com a geração de energia elétrica e estas representam 80% da redução das emissões.

GRÁFICO 12 – CUSTO MARGINAL DE ABATIMENTO POR ETE DO CENÁRIO V

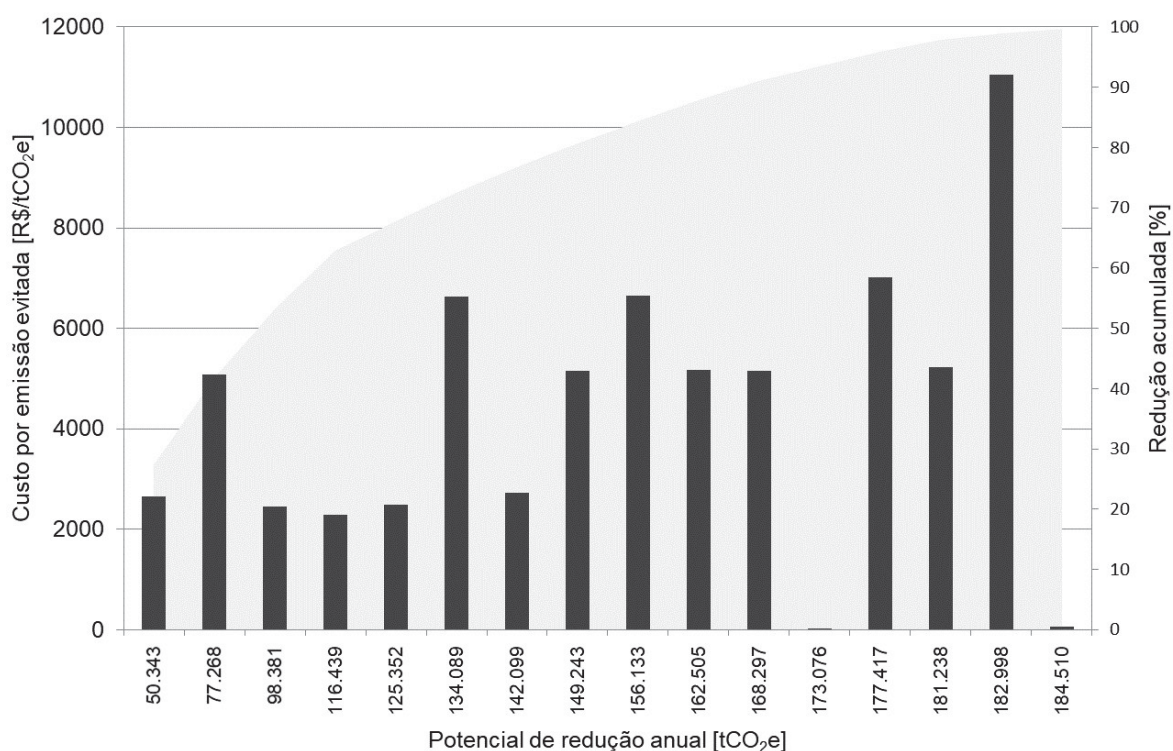
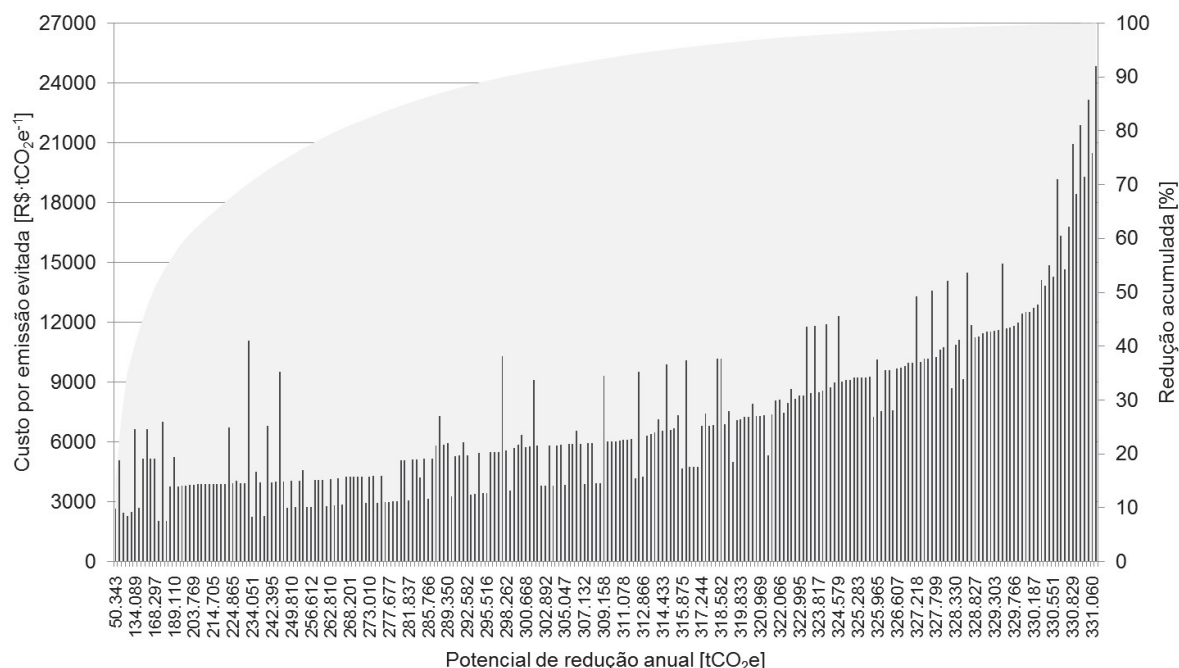


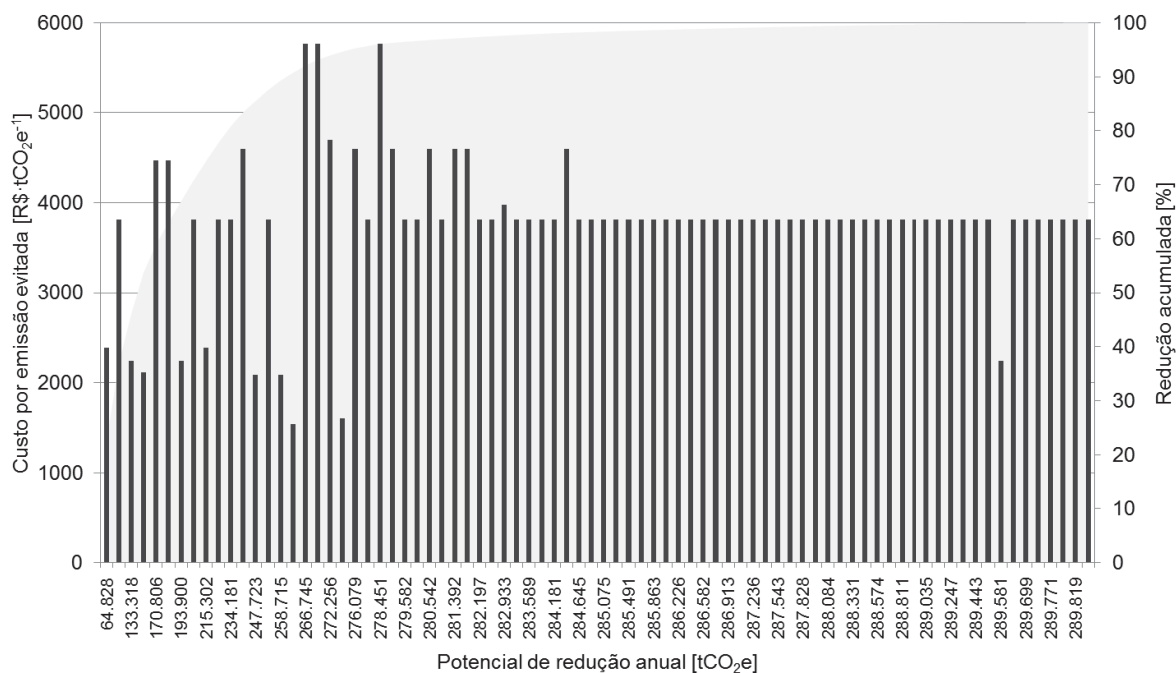
GRÁFICO 13 – CUSTO MARGINAL DE ABATIMENTO POR ETE DO CENÁRIO VI



Pelas curvas de abatimento dos cenários V e VI, ilustradas pelos GRÁFICOS 12 e 13, é possível analisar com clareza o custo por emissão evitada por ETE e verificar que em algumas ETEs o custo por emissão evitada ficará maior que o custo de abatimento do cenário como um todo. No cenário V, 7 ETEs teriam investimentos menores que R\$ 4.327,00·tCO<sub>2</sub>e<sup>-1</sup> e no cenário VI, 146 ETEs estariam nessa situação, além disso representariam 45,54% da redução de emissões do cenário.

Esse aspecto pode ser considerado um critério de priorização para implantação de medidas de mitigação de emissões de GEE. Além disso, o cenário V também pode ser considerado como uma etapa de implantação do cenário VI.

GRÁFICO 14 – CUSTO MARGINAL DE ABATIMENTO DO CENÁRIO VII



Nos cenários II, III e VI as ETEs que possuem altos potenciais de abatimento tendem a ter um custo menor para mitigar emissões. Já no cenário V, o custo é bem variável, independente do potencial de redução anual das ETEs. No cenário VII, o custo por emissão evitada é constante em muitas ETEs.

Por meio dessa análise, é possível planejar uma implantação gradual dos cenários, iniciar com a instalação de queimadores enclausurados nas ETEs maiores como prevê o cenário III e posteriormente nas ETEs menores até finalizar o cenário II por completo. Se a opção for o aproveitamento energético e mudança da concepção visando o aumento da eficiência, a implementação gradual pode se iniciar pelo cenário V, e no decorrer do tempo e amadurecimento da operação, dar continuidade até implantar o cenário VI por completo.

Como os gráficos de CMA são elaborados pelo potencial crescente de redução anual das emissões de GEE, é possível verificar que o custo de algumas ETEs apresenta valores fora da média das demais. Sendo assim, sugere-se para as áreas de projetos que sejam considerados todos os cenários de mitigação, a fim de propor a melhor situação para essas ETEs.

Carvalho (2016) obteve em sua análise custos anuais para reduzir uma tonelada de CO<sub>2</sub>e variando entre R\$ 3,98 e R\$ 14,29.tCO<sub>2</sub>e<sup>-1</sup>, valores bem abaixo dos encontrados nesse estudo. Ele também analisou o retorno financeiro dos

cenários, chegando resultado de até R\$14,23 milhões·MtCO<sub>2</sub>e<sup>-1</sup> no ano para o cenário que prevê a implementação de motogeradores em plantas com viabilidade quanto a geração de energia elétrica e a complementação de flares de baixa eficiência para as ETEs que não possuem flares no cenário Base.

#### 4.4 DIRETRIZES PARA UMA POLÍTICA DE BAIXO CARBONO

Baseadas nas estratégias corporativas de baixo carbono propostas por CNI (2011) e pelo roteiro mostrado por THIESEN (2018) foi elaborado um roteiro para implantação de gestão de emissões de GEE no prestador de serviços de saneamento.

Primeiramente quanto à mensuração das emissões, após a elaboração do IGEE anualmente, recomenda-se verificar o IGEE por uma terceira parte, garantindo que todas as fontes de emissão foram identificadas, e que na estimativa foi garantida materialidade.

Além da participação no Registro Público de Emissões de GEE, plataforma do Programa Brasileiro GHG Protocol, sugere-se avançar na comunicação, divulgando as ações e indicadores em relatórios corporativos sob GRI e relato em plataformas mais complexas como CDP.

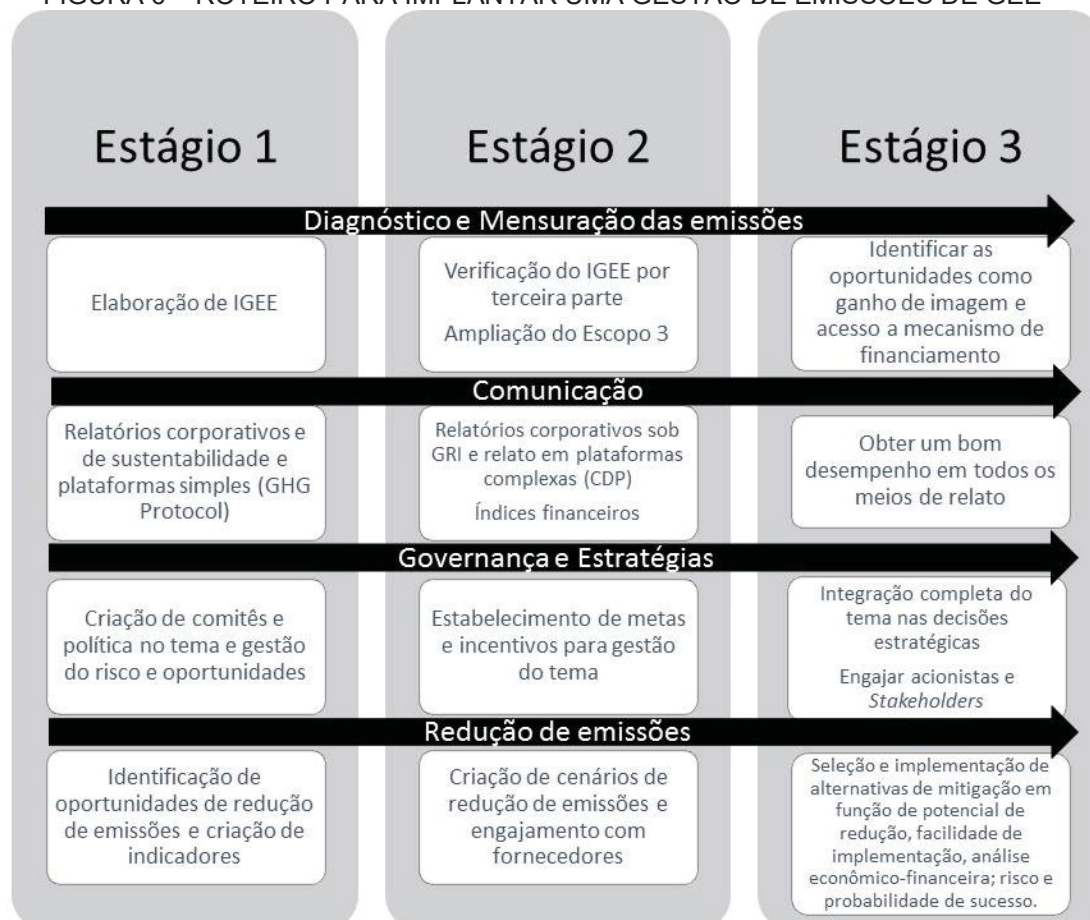
Para isso não basta responder aos questionários, é necessário ter uma boa compreensão sobre o tema. Sendo assim, recomenda-se aprimorar o entendimento das questões e respostas oferecidas, uma alternativa é transformar os questionamentos em planos de ação e com estratégias de curto, médio e longo prazo, visando um bom desempenho em todos os meios de relato.

A gestão de emissões de GEE não pode ser um projeto apenas da área ambiental da empresa, precisa ser um tema discutido e incorporado no planejamento estratégico e governança da corporação. Para isso, propõe-se a criação um comitê permanente que possa avaliar constantemente a gestão das emissões de GEE, precificar internamente o carbono, estabelecer metas de redução, analisar os riscos e oportunidades do tema e manter a corporação engajada.

Esse time deve trabalhar para identificar linhas de financiamento especiais para projetos de mitigação, participar de mercados de crédito de carbono, ou simulações, analisar ações tomadas pela concorrência e divulgar os resultados de todo esse trabalho.

A FIGURA 6 é um roteiro elaborado para guiar uma gestão de emissões de GEE.

FIGURA 6 – ROTEIRO PARA IMPLANTAR UMA GESTÃO DE EMISSÕES DE GEE



Fonte: Elaboração própria.

Para implantação da gestão de emissões de GEE no prestador de serviço de saneamento em estudo sugere-se, baseado no estudo de CNI (2011) e MISTAGE e BILOTTA (2018), que os seguintes riscos e oportunidades sejam avaliados pelo comitê a ser formado:

TABELA 22 – RISCOS E OPORTUNIDADES DE IMPLANTAÇÃO DE GESTÃO DE GEE NUM PRESTADOR DE SERVIÇOS DE SANEAMENTO

Riscos	Oportunidades
- Incertezas sobre novas regulamentações e legislações	- Acordos voluntários
- Taxação sobre emissões	- Incentivos financeiros para o desenvolvimento de novas tecnologias
- Sanções por falta de monitoramento e redução das emissões	- Eficiência operacional
- Mudanças nos padrões do efluente	- Venda de créditos de carbono

Riscos	Oportunidades
- Variação na frequência de eventos climáticos extremos	- Ampliação de parcerias
- Alterações no consumo da população	- Aumento de credibilidade da marca com a sociedade
- Dependência de tecnologias	- Responsabilidade Ambiental
- Despesas imprevistas: despesas adicionais para reparar sistemas e equipamentos	
- Necessidade de mão de obra especializada para operação dos equipamentos	

Além do roteiro proposto na FIGURA 6, os resultados desse trabalho permitem subsidiar a elaboração de diretrizes corporativas visando uma política de baixo carbono no setor de saneamento.

Algumas diretrizes de sustentabilidade já estão no Manual de Projetos de Saneamento (MPS) do prestador de serviços em estudo. A seguir evidencia-se a necessidade de considerar algumas premissas no desenvolvimento dos projetos de água e esgoto, na implantação das obras e na operação dos sistemas do prestador de serviços, são elas:

- Considerar variáveis ambientais, sociais e econômicas no mesmo nível de prioridade nas avaliações de alternativas de concepção de sistemas de abastecimento de água e coleta e tratamento de esgoto;
- Priorizar o uso de equipamentos e processos de maior eficiência energética;
- Buscar o aproveitamento energético nas concepções de reservatórios, barragens de acumulação e lançamentos de esgoto tratado;
- Estudar a possibilidade de parada operacional parcial e total de conjuntos moto-bombas nos horários de pico da tarifação de energia elétrica e de utilização de fonte própria de geração nesse período. Avaliar os custos operacionais gerados por cada uma das alternativas;
- Prever a medição do biogás gerado na concepção do processo de sistemas de tratamento de esgoto;
- Estudar a viabilidade do aproveitamento energético do biogás gerado no tratamento de esgoto, e no caso da inviabilidade deste aproveitamento energético, prever sistema adequado para a queima do biogás a fim de minimizar a geração de odores e de gases causadores de efeito estufa;



- Estudar outras medidas para minimização e controle da geração de odores nos SES.

Ademais, outras ações serão sugeridas neste trabalho e organizadas pelas categorias definidas no item 4.2.

#### 4.4.1 Combustão móvel e estacionária

Em relação aos combustíveis utilizados pela frota do prestador de serviços de saneamento composta por caminhões, equipamentos, motocicletas e veículos leves, os quais utilizam diferentes tipos de combustíveis, as diretrizes sugeridas são:

- Em veículos flex, o abastecimento deve ser realizado com etanol;
- Manter as revisões periódicas em dia em todos os veículos e equipamentos;
- Nos novos processos licitatórios, devem ser priorizados a aquisição ou locação de veículos movidos a biocombustíveis;
- Realizar um controle mais preciso dos combustíveis utilizados em equipamentos de fonte estacionária.

O levantamento da frota realizado apontou apenas a quantidade de veículos leve, os quais são movidos a diesel, gasolina ou flex (gasolina/ etanol). Não se sabe a quantidade de veículo por combustível, porém estima-se que 50% da frota de veículos leves fosse flex em 2015.

Supondo que a frota flex pode chegar a 70% dos veículos do prestador de serviço e que 100% desses são abastecidos com etanol, as emissões dessa categoria podem ser reduzidas em até 65,13%. Se a substituição de etanol pela gasolina fosse de apenas 50%, as emissões poderiam ser reduzidas em 32,56%.

Essas hipóteses mostram que com pouco esforço é possível reduzir consideravelmente as emissões de combustão móvel.

#### 4.4.2 Emissões fugitivas

Em relação às emissões fugitivas de equipamentos como ar-condicionado e refrigeradores do prestador de serviços de saneamento, a estimativa de emissões foi realizada baseada em fatores de emissões máximos da literatura. Uma forma de melhorar a estimativa é a realização de um levantamento real dos gases contidos nos equipamentos mencionados. Dessa forma, sugere-se que nas contratações de manutenção de equipamentos e extintores sejam exigidos do fornecedor os dados necessários para o cálculo, como quantidade e tipologia do gás refrigerante em cada equipamento.

#### 4.4.3 Emissões de metano provenientes do tratamento de efluentes

A análise dos cenários propostos mostrou diversas oportunidades de mitigação do metano proveniente das ETEs.

Analisando os cenários de linha de base para os anos 2020, 2025 e 2030 é possível perceber que há uma tendência de aumento das emissões de GEE com o aumento da cobertura dos serviços de coleta e tratamento de efluentes. Com os resultados do Inventário de GEE elaborado, foi constatado que as emissões oriundas das ETEs representam mais que 90% das emissões do prestador de serviço. Portanto, é fundamental que haja metas de redução para essa categoria.

Deste modo, projetos de novas ETEs devem considerar na análise de viabilidade, sistemas de recuperação e queima do biogás, conforme propostos nos cenários de mitigação.

Para as ETEs atuais, sugere-se eleger entre os cenários II e IV, o primeiro deles apresentou o menor indicador de intensidade carbônica, e o segundo não só apresentou o menor custo de abatimento, como apresentou receita. Ou seja, implantar sistema de aproveitamento energético nas maiores ETEs e analisar a instalação de queimador enclausurado nas demais, ou ao menos manter os queimadores abertos em pleno funcionamento nas menores.

Porém, vale destacar que os cenários V, VI e VII, apesar de apresentarem maiores custos para abatimento das emissões, devem ser considerados quando a ETE não estiver atendendo os padrões de lançamento dos corpos hídricos e



necessitarem da implantação de pós-tratamento para melhorar a remoção de carga orgânica.

Recomenda-se utilizar as CMA dos cenários para analisar as ETEs individualmente, podendo surgir um oitavo cenário de implantação.

#### 4.4.4 Emissões de metano provenientes dos aterros sanitários

Assim como nas ETEs, os aterros sanitários devem considerar adaptações para recuperação do biogás e geração de energia elétrica ou térmica. Além disso, instalação de centrais de reciclagem, visando a diminuição de resíduos sólidos depositados nas células.

#### 4.4.5 Energia elétrica

Para reduzir o consumo de energia elétrica e consequentemente as emissões do Escopo 2, deve-se investir em programas de eficiência energética. Ações como substituição de equipamentos antigos, otimização dos pontos de rendimento dos sistemas de bombeamento e perdas de água na rede de distribuição, devem ser premissas na rotina da área de operação.

#### 4.4.6 Compensação

Apesar de no Brasil ainda não ter definido metas de redução para o setor de saneamento, há uma forte tendência de órgãos ambientais estaduais cobrarem além do IGEE, um plano com metas de redução. Dessa forma, caberia a cada prestador de serviços estabelecer uma proposta.

Para esse estudo partiu-se de uma premissa conservadora com a linha de base para o ano 2015 diferentemente do que foi proposto pela meta brasileira, 2005 pode-se concluir que serão necessárias outras ações para atingir as reduções previstas nas metas brasileiras. Uma das alternativas é compensar as emissões que não puderam ser reduzidas. Em consulta ao site *Investing.com*, em 06/06/2018 a cotação da tonelada do carbono estava EUR16,00, com a cotação do euro a R\$4,36, a tonelada de carbono ficaria R\$69,76.

Portanto, considerando o cenário II que apresentou maior viabilidade em relação à redução de emissões de GEE e custo seria necessária a compra de 228.484,77 tCO<sub>2</sub>e, totalizando em R\$ 15.939.097,81 para atingir a meta brasileira para 2030 de 43% de redução de GEE.

Por mais que o valor da tonelada de carbono no mercado livre, na data consultada, seja menor que a estimativa de custo de implantação da maioria dos cenários propostos, a ordem de prioridade no controle de impactos ambientais, seguindo as premissas dos princípios do direito ambiental, deve ser primeiramente a prevenção, depois a mitigação, a recuperação e por fim, a compensação.

Sendo assim, recomenda-se que a compra de créditos de carbono seja realizada como complemento, quando a redução de emissões não for possível com as medidas de mitigação propostas.

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

De acordo com os resultados do diagnóstico da cobertura dos serviços do prestador de serviços de saneamento no Estado do Paraná no ano 2015, 100% da população era atendida com água tratada e 67,13% era atendida com rede coletora de esgoto. Para atender a população dos 345 municípios, o prestador de serviço de saneamento contava com 170 estações de tratamento de água e 234 estações de tratamento de esgoto.

O incremento populacional de atendimento em 2020 será de 9,6% em relação à linha de base, em 2025 o aumento será de 12,71% e em 2030 de 14,72%, o que demandará a instalação de novas ETEs. Em 2020 estão previstas 243 ETEs em operação, em 2025 e 2030 serão 258 e 283 plantas, respectivamente.

Em 2015, as emissões diretas provenientes das atividades de esgotamento sanitário, abastecimento de água, coleta e disposição final de resíduos sólidos urbanos do prestador de serviço foram estimadas em 1.144.430,58 tCO<sub>2</sub>e, sendo que 94,18% correspondem ao tratamento de efluentes. As emissões indiretas provenientes da compra de energia elétrica do sistema nacional foram estimadas em 84.230,13 tCO<sub>2</sub>e, das quais 91% são oriundas da produção e distribuição de água.

Como o tratamento de efluentes representa mais de 90% das emissões diretas, foram elaborados sete cenários de mitigação de emissões de GEE, incluindo a LB para essa categoria.

Por meio dos cenários propostos foi possível verificar que os cenários que mais reduzem as emissões de GEE em comparação com a linha de base de cada ano, são os cenários II, VI e VII, que preveem o emprego de tecnologias ainda incipientes entre os prestadores de serviços de saneamento no Brasil. O cenário II foi aquele que apresentou um resultado melhor devido à eficiência de conversão dos queimadores enclausurados. No cenário VI e VII além do emprego de tecnologias para geração de energia nas ETEs maiores, há previsão de implantação de pós-tratamento aeróbio em todas as estações. Os cenários III e V, podem ser considerados como etapa de implantação dos cenários II e VI respectivamente, e o cenário III tem o custo de abatimento mais baixo, tornando-se um cenário economicamente viável. Já o cenário IV, por mais que a redução não ultrapasse 10%, a possibilidade de gerar energia a partir da recuperação do biogás faz com que

o custo de abatimento seja negativo, ou seja, gere receita com a venda ou compensação de energia elétrica.

Com relação à pegada de carbono, os cenários que se mostram mais favoráveis são os cenários VI e II, que apresentaram valores de 1,67 e 1,74  $\text{kgCO}_2\text{e}\cdot\text{m}^{-3}$ .

Com relação ao indicador de intensidade carbônica, todos os cenários apresentaram valores abaixo da linha de base, 0,154  $\text{tCO}_2\text{e}\cdot\text{hab}^{-1}$ . Os cenários que apresentaram os valores mais baixos são VII, II e VI que apontaram uma intensidade carbônica de 0,137; 0,114 e 0,110  $\text{tCO}_2\text{e}\cdot\text{hab}^{-1}$  respectivamente.

Considerando essas três variáveis, pode-se concluir que o cenário II além de ter uma pegada de metano baixa para tratar 1  $\text{m}^3$  de esgoto, baixo intensidade carbônica, ainda apresenta um dos menores custos para implantação, em torno de R\$ 30,66/ano.

Esses resultados são subsídios para elaboração de diretrizes para uma política de baixo carbono e possibilitaram a construção de um roteiro para que o prestador de serviço possa gerenciar suas emissões de GEE e realizar suas atividades com baixo carbono emitido.

Recomenda-se verificar o IGEE por uma terceira parte frequentemente, divulgar as ações e indicadores em relatórios corporativos sob GRI e relato em plataformas mais complexas como CDP.

Destaca-se que a gestão de emissões de GEE deve estar incorporada no planejamento estratégico e governança da corporação, que a precificação interna do carbono deve ser considerada nos métodos de tomada de decisão, metas de redução de emissões de GEE devem ser estabelecidas.

Além disso, foram sugeridas ações como priorizar o abastecimento com etanol na frota flex; adição de critérios em editais de licitações para manutenção de equipamentos de emissões fugitivas; análise de viabilidade de sistemas de aproveitamento energético de biogás em projetos de ETEs e aterros sanitários; e finalmente programas de eficiência energética nas redes de abastecimento de água e plantas operacionais.

Assim como as diretrizes recomendadas, as estimativas realizadas nesse trabalho, e as premissas consideradas, podem ser adaptadas a outros prestadores de serviço como ferramenta de planejamento nessa temática.

Considerando que os padrões de lançamento para efluentes em corpos hídricos tendem a ficar cada vez mais restritos, e que sistemas com etapas aeróbias tendem a consumir mais energia e produzir mais lodo. Sugere-se em trabalhos futuros, estimar as emissões do Escopo 2 considerando o consumo energético dos cenários V, VI e VII, além de recalcular o retorno com a venda de energia desses cenários. E estimar as emissões provenientes da digestão do lodo ou outra destinação a ser dada.

## 5.1 TRABALHOS APRESENTADOS

Apresentação oral no 29º Congresso ABES/FENASAN/2017 na cidade de São Paulo em 05/10/2017 do trabalho titulado como Perspectivas de redução das emissões de gases de efeito estufa no tratamento de esgoto no Estado do Paraná até o ano de 2030.

Apresentação oral no Congresso Sustentar, da Faculdade Anchieta na cidade de Curitiba em 25/11/2017 do trabalho titulado como Inventário de gases de efeito estufa como ferramenta de gestão para o setor de saneamento.

Apresentação oral no 3º Símpósio MAUI Qualidade do ar: Gestão e monitoramento realizado na cidade de Curitiba no dia 05/04/2018 do trabalho titulado como Identificação das fontes e definição da abordagem de cálculo das emissões de gases de efeito estufa provenientes de um prestador de serviços de saneamento no Brasil.

Apresentação de palestra no minicurso Gestão de Carbono durante o 3º Símpósio MAUI Qualidade do ar: Gestão e monitoramento realizado na cidade de Curitiba durante os dias 03 a 05/04/2018.

Apresentação oral no XIV SIBESA 2018 – Símpósio Ítalo-Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental realizado em Foz de Iguaçu/PR no dia 20/06/2018 do trabalho titulado como Análise de sensibilidade para alteração do método para estimativa de emissões de gases de efeito estufa no tratamento de efluentes.

## REFERÊNCIAS

- ABIOGÁS. Associação Brasileira de Biogás e de Biometano. [Online]. Disponível em: <<https://www.abiogas.org.br/biogas-e-biometano>>. Acesso em: 22 mai. 2018.
- ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **Guia de implementação: Gestão de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa** [recurso eletrônico] Serviço Brasileiro de Apoio às Micro e Pequenas Empresas. – Rio de Janeiro: ABNT; Sebrae, 2015.
- ABRELPE. Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais. **Panorama dos Resíduos Sólidos do Brasil 2017**. Setembro, 2018. Disponível em: <[http://abrelpe.org.br/pdfs/panorama/panorama\\_abrelpe\\_2017.pdf](http://abrelpe.org.br/pdfs/panorama/panorama_abrelpe_2017.pdf)>. Acesso em: 28 set. 2018.
- ALVIM, R. B.; MELLO, W. Z.; SILVEIRA, C. S.; KLIGERMAN, D. C.; RIBEIRO, R. P. **Emissões de óxido nitroso em águas fluviais não poluídas e poluídas da Bacia do Rio Paquequer (Teresópolis, Rio de Janeiro)**. In: Engenharia Sanitária e Ambiental. v.19 n.4 471-478. Dezembro, 2014. Disponível em: <<https://www.researchgate.net/publication/276316065>>. Acesso em: 05 mai. 2018.
- ANA. Agência Nacional das Águas. Resolução nº 601 de 25 de maio de 2015. Aprova o Regulamento do Programa Despoluição de Bacias Hidrográficas – PRODES. Anexo II. Disponível em: <<http://arquivos.ana.gov.br/resolucoes/2015/601-2015.pdf?130735>>. Acesso em: 04 jul.18.
- ANDRADE, V. Economia de baixo carbono: 5 passos para chegarmos lá. In: Blog WayCarbon [Online]. 27 jun. 17. Disponível em: <<http://blog.waycarbon.com/2017/06/passos-para-economia-de-baixo-carbono/>>. Acesso em: 07 jun. 2018.
- ANEEL. Agência Nacional de Energia Elétrica. Resolução Normativa nº 482 de 17 de abril de 2012. Estabelece as condições gerais para o acesso de microgeração e minigeração distribuída. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2012482.pdf>>. Acesso em: 03 jul. 2018.
- BANCO CENTRAL [Online]. Calculadora do cidadão para correção de valores. Disponível em: <<https://www3.bcb.gov.br/CALCIDADA0/publico/corrigirPorIndice.do?method=corrigirPorIndice>>. Acesso em: 15 nov. 2017.
- BANCO MUNDIAL; Ecofys. (2016). **CARBON PRICING WATCH 2016**: An advance brief from the State and Trends of Carbon Pricing 2016 report, to be released late 2016. Disponível em: <[https://www.ecofys.com/files/files/world-bank-group\\_ecofys-carbon-pricing-watch\\_160525.pdf](https://www.ecofys.com/files/files/world-bank-group_ecofys-carbon-pricing-watch_160525.pdf)>. Acesso em: 20 nov. 2017.
- BITTENCOURT, F. Compensação de GEE: tudo o que você precisa saber. In: Blog WayCarbon [Online]. 18 mai. 18. Disponível em:

<<http://blog.waycarbon.com/2018/05/compensacao-de-gee/>>. Acesso em: 07 jun. 2018.

BRASIL. Lei nº 11.445, de 5 de janeiro de 2007. Estabelece diretrizes nacionais para o saneamento básico. Disponível em: <[http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2007-2010/2007/lei/l11445.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2007/lei/l11445.htm)>. Acesso em: 12 jan. 2018.

\_\_\_\_\_. Comitê Interministerial sobre Mudança do Clima. **Plano Nacional sobre Mudança do Clima (PNMC)**. Brasília, dez 2008.

\_\_\_\_\_. Ministério das Cidades. Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental – SNSA. **Cartilha do Plano de Saneamento Básico Participativo**. Brasília: SNSA/MCIDADES, [2008b]. Disponível em: <[http://www.meioambiente.pr.gov.br/arquivos/File/coea/pncpr/Cartilha\\_Plano\\_de\\_Saneamento\\_Basico\\_Participativo.pdf](http://www.meioambiente.pr.gov.br/arquivos/File/coea/pncpr/Cartilha_Plano_de_Saneamento_Basico_Participativo.pdf)>. Acesso em: 24 out.2017.

\_\_\_\_\_. Lei nº 12.187, de 29 de dezembro de 2009. Institui a Política Nacional sobre Mudança do Clima – PNMC e dá outras providências. Disponível em: <[http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2007-2010/2009/lei/l12187.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2009/lei/l12187.htm)>. Acesso em: 12 jan. 2018.

\_\_\_\_\_. Lei nº 12.305, de 02 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos. Disponível em: <[http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm)>. Acesso em: 12 jan. 2018.

\_\_\_\_\_. **Instrução Normativa nº 39, de 24 de outubro de 2012**. Regulamenta os procedimentos e as disposições relativos às operações de crédito no âmbito do Programa Saneamento para Todos. Ministério das Cidades. Brasília, 2012.

\_\_\_\_\_. Ministério das Cidades. Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental. **Plano Nacional de Saneamento Básico – PLANSAB**. Brasília, DF, maio de 2013.

\_\_\_\_\_. Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental. Probiogás. **Guia técnico de aproveitamento energético de biogás em estações de tratamento de esgoto**. Ministério das Cidades, Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit GmbH (GIZ). – Brasília, DF: Ministério das Cidades, 2015a. 183 p.

\_\_\_\_\_. MMA – Ministério de Meio Ambiente. **Fundamentos para a Elaboração da Pretendida Contribuição Nacionalmente Determinada (INDC) do Brasil no contexto do Acordo de Paris**. Brasília, DF: 2015b. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/clima/convencao-das-nacoes-unidas/acordo-de-paris/item/10710>>. Acesso em: 12 jan. 2018.

\_\_\_\_\_. Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental. Probiogás. **Análise da viabilidade técnico-econômica de produção de energia elétrica em ETEs no Brasil a partir do biogás**. Ministério das Cidades, Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit GmbH (GIZ). Brasília, DF: Ministério das Cidades, 2016a. 145 p.



\_\_\_\_\_. Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação. Secretaria de Políticas e Programas de Pesquisa e Desenvolvimento. Coordenação-Geral de Mudanças Globais de Clima. **Terceira Comunicação Nacional do Brasil à Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima – Sumário Executivo**. Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação, 2016b. 45 p.

\_\_\_\_\_. Ministério das Cidades. Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental – SNSA. Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento: **Diagnóstico dos Serviços de Água e Esgotos – 2015**. Brasília: SNSA/MCIDADES, 2017a. 212 p.

\_\_\_\_\_. Decreto Federal nº 9.172 de 17 de outubro 2017. Institui o Sistema de Registro Nacional de Emissões – SIRENE dispõe sobre os instrumentos da PNMC. Brasília, DF, 2017b.

\_\_\_\_\_. Resolução ANP nº 685 de 29 de junho de 2017. Estabelece as regras para aprovação do controle da qualidade e a especificação do biometano oriundo de aterros sanitários e de estação de tratamento de esgoto destinado ao uso veicular e às instalações residenciais, industriais e comerciais a ser comercializado em todo o território nacional. Brasília, DF, 2017c.

BORTOLI, M.; KUNZ, A.; SOARES, H. M.; BELLÍ, P. F.; COSTA, R. H. R. **Emissão de óxido nitroso nos processos de remoção biológica de nitrogênio de efluentes**. In: Engenharia Sanitária e Ambiental. v.17 n.1 1-6. Março 2012.

CABRAL, C. B. G. Avaliação da produção de biogás para fins energéticos em reatores anaeróbios tratando esgoto sanitário. **Dissertação** (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina, Centro tecnológico, Florianópolis, SC, 2016.

CARVALHO, M. E. Diretrizes para a promoção de uma economia de baixo carbono no setor de esgotamento sanitário paranaense a partir da recuperação do biogás gerado em reatores anaeróbios. 118f. **Dissertação** (Mestrado profissional) – Programa de Pós-Graduação Stricto Sensu do Instituto Superior de Administração e Economia do Mercosul, ISAE, Curitiba, 2016.

CETESB. 1º Inventário de Emissões Antrópicas de Gases de Efeito Estufa Diretos e Indiretos do Estado de São Paulo. Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. São Paulo, 2011.

CHERNICHARO, C. A. L. **Reatores anaeróbios**. 2. ed. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental. Universidade Federal de Minas Gerais, 2007. 380 p. (Princípios do tratamento biológico de águas residuárias, v.5).

CNI. Confederação Nacional da Indústria. **Estratégias Corporativas de Baixo Carbono: Gestão de Riscos e Oportunidades**. Brasília, 2011. 56 p.:il.

COPASA. Companhia de Saneamento de Minas Gerais. Inventário de Emissões de Gases de Efeito Estufa COPASA – 2014. Belo Horizonte/MG. Set. 2015.



COPEL. Companhia de Energia Elétrica do Paraná. [Online]. Disponível em: <<http://www.copel.com/hpcopel/root/nivel2.jsp?endereco=%2Fhpcopel%2Froot%2Fpagcopel2.nsf%2F5d546c6fdeabc9a1032571000064b22e%2F424c5fac3731460e03257488005939ef>>. Acesso em: abril. 2018.

CONTI, J. B. (2005). **On global climatic changes**. Revista do Departamento de Geografia. Universidade de São Paulo (USP), n. 16, p. 70-75.

COSTA, D. F. da. Geração de energia elétrica do biogás do tratamento de esgoto. 2006. 194 p. **Dissertação** (Mestrado). Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

DAELMAN, M. R. J.; VOORTHUIZEN, E. M. V.; DONGEN, U. G. J. M.; VOLCKE, E. I. P.; LOOSDRECHT, M. C. M. Methane emission during municipal wastewater treatment. **Water Research** 46 (2012) 3657-3670.

DWA. **Normas e Recomendações Técnicas DWA-M 361PT - Tratamento de Biogás**. Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V. Alemanha, p. 40, 2011.

EUROPEAN COMMISSION. **Company GHG Emissions Reporting**: a Study on Methods and Initiatives. October/2010.

EPA. **Opportunities for Combined Heat and Power at Wastewater Treatment Facilities**: Market Analysis and Lessons from the Field. EPA, U.S. Environmental Protection Agency. U.S. Environmental Protection Agency Combined Heat and Power Partnership. [S.I.]. 2011.

FEAM. Fundação Estadual de Meio Ambiente. Inventário de Emissões de Gases de Efeito Estufa do Estado de Minas Gerais – 2005.

FIELD, B. C.; FIELD, M. K. **Introdução à Economia do Meio Ambiente**, 6. ed. New York: The McGraw-Hill Global Education Holdings. Tradução para o português por Christiane de Brito Andrei. (2014) AMGH Editora Ltda., a Grupo A Educação S.A. Company.

FILIPPINI, R. M. K.; POSSETTI, G. R. C.; AMARAL, K. J. Identificação das fontes e definição da abordagem de cálculo das emissões de gases de efeito estufa provenientes de um prestador de serviços de saneamento no Brasil. In: Anais do 3º Simpósio MAUI Qualidade do ar: Gestão e monitoramento, 2018.

FOKAL, 2017. Soluções Industriais Confiáveis. [Online] Disponível em: <[www.fokal.com.br](http://www.fokal.com.br)>. Acesso em 16 nov. 2017.

FREITAS, M. A. V. **Opções de Mitigação de Emissões de gases de Efeito Estufa em Setores-Chaves do Brasil**: Setor de Gestão de Resíduos. In: Ciclo de Workshops Setoriais das Opções de Mitigação de Emissões de gases de Efeito Estufa em Setores-Chaves do Brasil, Brasília, set. 2016. Disponível em: <<http://www.mctic.gov.br/mctic/opencms/textogeral/OpcoesDeMitigacaoDeEmissoesDeGasesDeEfeitoEstufa.html>>. Acesso em: nov. 2017.

GOUVELLO, C.; BRITALDO, S.S.F.; NASSAR, A.; SCHAEFFER, R.; ALVES, F.J.; ALVES, J.W.S. 2010. **Estudo de Baixo Carbono para o Brasil**. Washington DC. Banco Mundial. Disponível em: <[http://www.esmap.org/sites/esmap.org/files/LowCarbon\\_Fulldoc.pdf](http://www.esmap.org/sites/esmap.org/files/LowCarbon_Fulldoc.pdf)>. Acesso em: jan. 2018.

GHG Protocol (2017). **Ferramenta de Cálculo Programa Brasileiro GHG Protocol**. Disponível em: <<http://www.ghgprotocolbrasil.com.br/ferramenta-de-calculo>>. Acesso em: 20/10/2017.

GVCES. Centro de Estudos em Sustentabilidade FGV; WRI. World Resources Institute. **Especificações do Programa Brasileiro GHG Protocol**. Contabilização, Quantificação e Publicação de Inventários Corporativos de Emissões de Gases de Efeito Estufa. 2ª ed. São Paulo, SP, 2010. Disponível em: <<http://ghgprotocolbrasil.com.br/especificacoes-e-notas-tecnicas-do-programa-brasileiro-ghg-protocol/?locale=pt-br>>. Acesso em: 24 out. 2017.

GVCES. Centro de Estudos em Sustentabilidade FGV (2016). **Diretrizes empresariais para precificação interna do carbono**. Plataforma Empresas pelo Clima. São Paulo, SP, 2016.

GRI. Global Reporting Initiative. **Additional Public Comment Period for G4 Thematic Revisions**: Submissions. Document 12 of 12 – Greenhouse Gas (GHG) emissions. February 2013.

GREEN, J. (2010) Private standards in the climate regime: The greenhouse gas protocol. **Business & Politics** 12(3): 1–37.

HAMILTON, K., SJARDIN, M., SHAPIRO A., MARCELLO T. **Fortifying the Foundation: State of the Voluntary Carbon Markets 2009**. A Report by Ecosystem Marketplace & New Carbon Finance 20 May 2009.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE. **Pesquisa Nacional de Saneamento Básico 2008**. Rio de Janeiro, 2010. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/estatisticas-novoportal/multidominio/meio-ambiente/9073-pesquisa-nacional-de-saneamento-basico.html>>. Acesso em: 15 dez.2017.

ICLEI. Governos Locais pela Sustentabilidade. **RESUMO EXECUTIVO: Adaptação baseada em ecossistemas**. Oportunidades para políticas públicas em mudanças climáticas. Fundação Boticário. Curitiba, 2014.

INPE. Instituto Nacional de Pesquisas Especiais. MOHC. Met Office Hadley Centre. **Riscos das Mudanças Climáticas no Brasil**. Análise conjunta Brasil-Reino Unido sobre os impactos das mudanças climáticas e do desmatamento na Amazônia. Maio, 2011. Disponível em: <<http://www.inpe.br/noticias/arquivos/pdf/relatorioport.pdf>>. Acesso em: 28 set. 2018.

INSTITUTO TRATA BRASIL. **O Manual do Saneamento Básico. 2012**. Disponível em: <<http://www.tratabrasil.org.br/datafiles/uploads/estudos/pesquisa16/manual-imprensa.pdf>>. Acesso em: 20 out. 2017.

INVESTING. (2018). [Online]. Disponível em:  
<<https://br.investing.com/commodities/carbon-emissions>>. Acesso em 09 jun.2018.

IPARDES. Instituto Paranaense de Desenvolvimento Econômico e Social. **Projeção Populacional 2016- 2036**. Disponível em:  
<[http://www.ipardes.pr.gov.br/imp/imp.php?page=consulta&action=var\\_list&busca=Populacao+Projetada+-+IPARDES](http://www.ipardes.pr.gov.br/imp/imp.php?page=consulta&action=var_list&busca=Populacao+Projetada+-+IPARDES)>. Acesso em: 22 jan. 2017.

IPEA. Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada. **Sustentabilidade Ambiental no Brasil: biodiversidade, economia e bem-estar humano. Utilização do mecanismo de Desenvolvimento Limpo**. Comunicados do IPEA. Rio de Janeiro, RJ, 23. Fev 2011.

IPEA. Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada. **Curvas de custos marginais de abatimento de gases de efeito estufa no Brasil**: Resenha e Oportunidades de Mitigação. Rio de Janeiro, RJ, 2012.

IPCC. Intergovernmental Panel on Climate Change. **Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories**, Prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme, Eggleston H.S., Buendia L., Miwa K., Ngara T. and Tanabe K. (eds). Published: IGES, Japan, 2006.

\_\_\_\_\_. Intergovernmental Panel on Climate Change. **Climate Change 2007: Synthesis Report**. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, Pachauri, R.K and Reisinger, A. (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 2007.

\_\_\_\_\_. Intergovernmental Panel on Climate Change. Resumo para Decisores. In: **Climate Change 2013: The Physical Science Basis**. Contribuição do Grupo de Trabalho I para o Quinto Relatório de Avaliação do Painel Intergovernamental sobre Alterações Climáticas [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, Reino Unido e Nova Iorque, NI, EUA, 2013.

\_\_\_\_\_. Intergovernmental Panel on Climate Change. **Climate Change 2014: Synthesis Report**. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 2014, 151 pp.

KAMPSCHREUR, M. J., TEMMINK, H., KLEEREBEZEM, R., JETTEN, M. S. M., VAN LOOSDRECHT, M. C. M. Nitrous oxide emission during wastewater treatment. In: **Water Research** 43(17), p.4093-4103, 2009.

KIMURA, W. J., SANTOS, E. F. Custo marginal de abatimento de emissões de gases de efeito estufa na recuperação de pastagem. In: *Revista iPecege* 2(4): 9-23, 2016.

LEFÈVRE, G. **Conceitos, alternativas e perspectivas da Precificação de Carbono no Brasil**. In: Diálogos sobre o clima, Curitiba, 27 out. 2017. Disponível em: <http://www.forumclima.pr.gov.br/modules/conteudo/conteudo.php?conteudo=100>. Acesso em: 20 nov. 2017.

LOBATO, L. C. D. S. Aproveitamento Energético de Biogás Gerado em Reatores UASB Tratando Esgoto Doméstico. Belo Horizonte: **Tese de Doutorado**. Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG) - Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental (DESA), 2011.

LUPATINI, G.; WAISS, T. C. F.; CARNEIRO, C.; POSSETTI, G. R. C. Avaliação do potencial de redução das emissões de gases do efeito estufa no setor de saneamento: Estudo de caso na região norte do Paraná. In: Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental. Rio de Janeiro, RJ, 2015.

MACHADO, R. M. G. Estudo da Associação em Série de Reator UASB e Filtros Anaeróbios para Tratamento de Esgotos Sanitários. Belo Horizonte: DESA/UFMG, 1997.

MCTIC. Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações. **Trajetórias de mitigação e instrumentos de políticas públicas para alcance das metas brasileiras no acordo de Paris** / RATHMANN, R., ARAÚJO, R. V., CRUZ, M. R., MENDONÇA, A. M. - Brasília: Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações, ONU Meio Ambiente, 2017. 64 p.: il. – (Opções de mitigação de emissões de gases de efeito estufa em setores-chave do Brasil).

MCTIC. Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações. Sistema de Registro Nacional de Emissões (SIRENE) [Online]. Disponível em: <<http://sirene.mcti.gov.br/>>. Acesso em: 15 dez.17.

MAGALHÃES, A. S. Economia de baixo carbono no Brasil: alternativas de políticas e custos de redução de emissões de gases de efeito estufa. **Tese de Doutorado**. - Universidade Federal de Minas Gerais, Centro de Desenvolvimento e Planejamento Regional, 2013.

MASSARA, T. M.; MALAMIS, S.; GUIASOLA, A.; BAEZA, J. A.; NOUTSOPOULOS, C.; KATSOU, E. A review on nitrous oxide (N<sub>2</sub>O) emissions during biological nutrient removal from municipal wastewater and sludge reject water. In: **Science of The Total Environment**. Vol. 596-597, 15 out. 2017, p.106-123.

METCALF & EDDY. (2013) **Wastewater Engineering: Treatment and Reuse**, 5th Edition. The McGraw-Hill Companies, Inc., New York, New York 10020. Tradução para o português por Ivanildo Hespanhol e José Carlos Mierzwa. (2016) Tratamento de Efluentes e Recuperação de Recursos. AMGH Editora Ltda., a Grupo A Educação S.A. Company.

METZGER, J. P. Uma visão global da fragmentação. Revista Página 22. São Paulo, n. 5, p.48-51. Fev, 2007.

MIKI, R. E. Biometano produzido a partir de biogás de ETEs e seu uso como combustível veicular. In: Revista DAE, v.66, n.209. Março, 2018.

MINAS GERAIS. Lei nº 20.824 de 31 de julho de 2013. Altera a Lei nº 6.763/1975 a qual consolida a Legislação Tributária do Estado de Minas Gerais e dá outras providências. Belo Horizonte/MG, 2013.

MISTAGE-HENRÍQUEZ, O.; BILOTTA, P. Panorama da contabilização de emissões de gases de efeito estufa do setor industrial brasileiro. **Sustentabilidade em debate**. V. 7, n. 1 (2016).

MMA. Ministério do Meio Ambiente. Inventário do Consumo de Substâncias que Destroem a Camada de Ozônio. Out. 2013. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/informma/item/587-consumo-de-sdos>>. Acesso em: 03 jul.18.

MMA. Ministério do Meio Ambiente [Online]. Mudança do Clima. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/clima/convencao-das-nacoes-unidas>>. Acesso em: 23 out.17.

MOURA, A. M. M.. Aplicação ds instrumentos de política ambiental no Brasil: avanços e desafios. In: Moura, Adriana M.M. (Org.). Governança ambiental no Brasil: instituições, atores e políticas públicas. Brasília: Ipea, 2016, v. único, p. 111-146.

NOBRE, C. A.; REID, J.; VEIGA, A. P. S. Fundamentos científicos das mudanças climáticas. São José dos Campos, SP: Rede Clima/INPE, 2012. 44 p.

NOYOLA, A.; MORGAN-SAGASTUME, J. M.; LÓPEZ-HERNÁNDEZ, J. E. Treatment of biogas produced in anaerobic reactors for domestic wastewater: odour control and energy/resource recovery. **Reviews in Environmental Sciences and Bio/Technology**, v.5, 93-114, 2006.

NOYOLA, A.; PAREDES, M. G.; MORGAN-SAGASTUME, J. M.; GUERECA, L. P. Reduction of Greenhouse Gas Emissions from municipal wastewater treatment in Mexico based on technology selection. **Clean, Soil, Air, Water**. Junho/2016. ONUBR. Organização das Nações Unidas no Brasil [Online]. Disponível em: <<https://nacoesunidas.org/docs/meio-ambiente/>>. Acesso em: 23 out.17.

PACTO GLOBAL ONU, SECRETARIADO CQNUMC, PNUMA E WRI. (2015). Executive Guide to Carbon Pricing Leadership - A Caring for Climate Report. UN Global Compact; secretariado da CQNUMC; PNUMA; WRI.

PARANÁ. (2013) Secretaria Estadual de Meio Ambiente e Recursos Hídricos (SEMA). Inventário de Emissões Antrópicas Diretas e Indiretas de Gases de Efeito Estufa 2005-2012. Resumo Executivo. Disponível em: <[http://www.meioambiente.pr.gov.br/arquivos/File/ResumoExecutivo\\_PR.pdf](http://www.meioambiente.pr.gov.br/arquivos/File/ResumoExecutivo_PR.pdf)>. Acesso em: 01/12/2017.

PARANÁ. Lei Estadual nº 17.133 de 25 de abril de 2012. Institui a Política Estadual sobre Mudança do Clima. Curitiba, 2012.

\_\_\_\_\_. Resolução SEMA nº 16 de 26 de março de 2014. Define critérios para o Controle da Qualidade do Ar. Curitiba, 2014.

\_\_\_\_\_. Resolução Secretaria Estadual do Meio Ambiente (SEMA) nº 09 de 19 de junho de 2017. Dispõe sobre o registro público estadual de emissões de gases de efeito estufa no Estado do Paraná. Curitiba, 2017.

\_\_\_\_\_. Lei Estadual nº 19.500 de 21 de maio de 2018. Institui a Política Estadual do Biogás, do Biometano e demais produtos. Curitiba. 2018.

PAGANINI, W. S. Mudanças Climáticas – Programa Corporativo de gestão das Emissões de Gases de Efeito Estufa. In: Ciclo de Conferências de Gestão Ambiental. São Paulo, SP, 2013. Disponível em: <<http://site.sabesp.com.br/uploads/file/Programa%20Corporativo%20da%20Gest%C3%A3o%20das%20Emiss%C3%B5es%20de%20Gases%20de%20Efeito%20Estufa.pdf>>. Acesso em: 24 out.2017.

PECORA, V. Implementação de uma Unidade Demonstrativa de Geração de Energia Elétrica a partir do Biogás de Tratamento do Esgoto Residencial da USP: estudo de caso. 2006. 152 p. **Dissertação** (Mestrado). Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

POSSETTI, G. R. C.; JASINSKI, V. P.; MESQUITA, N. C.; KRIGUEL, K.; CARNEIRO, C. Medições em tempo real do biogás produzido em reatores UASB alimentados com esgoto doméstico. In: Anais do 27º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, 2013.

POSSETTI, G. R. C., CARNEIRO, C., RIETOW, J. C., LUKOW, R. F., WAISS, T. C. F., CHERNICHARO, C. A. L., SOUZA, C. L., LOBATO, L. C. S. (2015). ProBio - Programa de estimativa de produção de biogás em reatores UASB, Curitiba: s.n.

POSTEL, J.; JUNG, U.; EL. FISCHER, F. S. T. W. H. G. A. S. P. W. Tecnologia de Usinas para Produção de Biogás. In: (FNR), F. N. R. E. V. **Guia Prático do Biogás: Geração e Utilização**. Alemanha: FNR, 2010. p. 234.

PROSAB. Reatores Anaeróbios – Proposta de Ação Conjunta entre Pesquisadores e Empresas de Saneamento apoiada pela FINEP. PROSAB. In: 26º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental. Porto Alegre-RS. 2011.

RIO DE JANEIRO. Terceiro Inventário das Emissões de Gases de Efeito Estufa. Coppe – Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia, da Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, RJ, 2017. Disponível em: < <http://www.rj.gov.br/web/sea/exibeconteudo?article-id=1867698>>. Acesso em: 15 dez.2017.

\_\_\_\_\_. Lei Estadual nº 6361 de 18 de dezembro de 2012. Política Estadual de Gás Natural Renovável. Rio de Janeiro, 2012.



ROGERS. M., BRUEN M., MAYSTRE L. Y. (2010) Electre and decision support. METHODS AND Applications in Engineering and Infrastructure Investment. Kluwer Academic Publishers, Norwell.

SALINAS, N. R., BUSTOS, C. V. Estudio de políticas, medidas e instrumentos para la mitigación de gases de efecto invernadero en el sector aguas residuales en México. 2012. Intituto Mexicano de tecnologia del agua. Secretaria de Meio Ambiente y Recursos Naturales.

SANEPAR. Relatório de Administração e Sustentabilidade 2015. Disponível em: <[https://site.sanepar.com.br/sites/site.sanepar.com.br/files/investidores\\_rel\\_ian\\_dfp\\_itr/ian-dfp-itr/rel\\_Relat%C3%B3rios%20Trimestrais2015-12-31\\_0.pdf](https://site.sanepar.com.br/sites/site.sanepar.com.br/files/investidores_rel_ian_dfp_itr/ian-dfp-itr/rel_Relat%C3%B3rios%20Trimestrais2015-12-31_0.pdf)>. Acesso em: 22 jan. 2017.

\_\_\_\_\_. Relatório de Administração e de Sustentabilidade 2016. Disponível em: <[http://site.sanepar.com.br/sites/site.sanepar.com.br/files/investidores\\_rel\\_ian\\_dfp\\_itr/ian-dfp-itr/rel\\_Relat%C3%B3rios%20Trimestrais2016-12-31\\_0.pdf](http://site.sanepar.com.br/sites/site.sanepar.com.br/files/investidores_rel_ian_dfp_itr/ian-dfp-itr/rel_Relat%C3%B3rios%20Trimestrais2016-12-31_0.pdf)>. Acesso em: 20 out. 2017.

\_\_\_\_\_. (2016b) Sistema de Informações e Gestão da Sanepar. Acesso em: 20 out. 2017.

\_\_\_\_\_. (2016c) Informações da Unidade de Serviço de Esgoto da Sanepar. Acesso em: 20 out. 2017.

\_\_\_\_\_. (2016d) Sistema de Gerenciamento de Fatura de energia elétrica da Sanepar. Acesso em: 20 out. 2017.

\_\_\_\_\_. (2016e) Informações da Unidade de Gerenciamento de Resíduos Sólidos da Sanepar. Acesso em: 20 out. 2017.

\_\_\_\_\_. Companhia de Saneamento do Paraná. Inventário de Emissões de Gases de Efeito Estufa do ano de 2016. Curitiba, 2017. Disponível em: <<http://site.sanepar.com.br/sustentabilidade/inventario-de-gases-de-efeito-estufa>>. Acessado em: outubro de 2017.

SANTOS, J. O. Inventário das emissões de gases de efeito estufa (GEE) na Embasa: oportunidades para o aprimoramento da gestão das emissões. 160f. **Tese** – Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2015.

SANTOS, J. A. dos. Viabilidade econômica de exploração de um biodigestor na produção de energia na cidade de Varginha/MG – estudo de caso. 63p. **Dissertação** - Universidade Federal de Lavras, 2017.

SANTOS, I. F. S., VIEIRA, N. D. B. Aproveitamento energético do biogás em uma ETE anaeróbia em Itajubá (MG): Uma avaliação teórica de potencial e custos. In: Anais do XXI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. Brasília/DF, 2015.

SANTOS, I. F. S., LEITE, M. D. P., BARROS, M. B., TIAGO, G. L. Um estudo dos custos de implantação de empreendimentos de aproveitamento energético do biogás

de estações de tratamento de esgoto. Revista Brasileira de Energia, Vol. 20, 2014, pp.145-155.

SÃO PAULO. Decreto Estadual nº 58.659 de 4 de dezembro de 2012. Programa paulista de biogás. São Paulo, 2012.

SCHWARTZ, D. L., SANTOS, F. F., NADAL, Z. L. I. Estudo do aproveitamento de biogás gerado em estação de tratamento de esgoto da Sanepar para geração de energia elétrica: O caso da ETE Atuba Sul – Curitiba/PR. 2011. 109p. **TCC** – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2011.

SEEG. (2016). Sistema de Estimativas de Emissões de Gases de Efeito Estufa. [Online]. Disponível em: <[www.seeg.eco.br](http://www.seeg.eco.br)>. Acesso em 12/03/2017.

SEMA. (2017) Secretaria Estadual de Meio Ambiente. [Online]. Disponível: <<http://www.meioambiente.pr.gov.br/modules/conteudo/conteudo.php?conteudo=326>>. Acesso em: 01/12/2017.

SILVA, T. C. F., POSSETTI, G. R. C., COELHO, S. T. 2014. Avaliação do Potencial de Produção de Energia a partir do Biogás Gerado no Tratamento de Esgotos Domésticos, Curitiba: s.n.

SILVA, T. C. F. Utilização de biogás de estações de tratamento de esgoto para fins energéticos. **Dissertação** (Mestrado – Programa de Pós-Graduação em Energia). EP / FEA / IEE / IF da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2015.

SILVEIRA, A. S. L. F., MENSAH, J. H. R., BATTISTON, K. M., BARROS, M. S., SANTOS, I. F. S. Dimensionamento de um reator UASB para tratamento de efluentes domésticos e recuperação do biogás para produção energética: Um estudo de caso em Pouso Alegre/MG. In: Revista Brasileira de Energias Renováveis, v.7, n.1, p. 77-94, 2018.

SOUZA, C. L. Estudo das Rotas de Formação, Transporte e Consumo dos Gases Metano e Sulfeto de Hidrogênio Resultantes do Tratamento de Esgoto Doméstico em Reatores UASB. Belo Horizonte: **Tese de Doutorado**, Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG). Escola de Engenharia, 2010.

SWEETAPPLE, C. G. (2014) Developing Strategies for the reduction of greenhouse gas emissions from wastewater treatment. **Thesis for the degree of Doctor os Philosophy in Engineering**. University of Exeter. 352p.

THIESEN, M. P. Identificação de oportunidades de mecanismos de desenvolvimento limpo para o Mercado de crédito de carbono nas cooperativas agropecuárias paranaenses. **Dissertação** (Mestrado profissional em Meio Ambiente Urbano e Industrial). Universidade Federal do Paraná em parceria com o SENAI-PR e a Universität Stuttgart, Alemanha. Curitiba/PR, 2010.

THIESEN, M. P. Minicurso Gestão de Carbono In: 3º Simpósio MAUI. Curitiba, PR. Abr. 2018.



UNFCCC. United Nations Framework Convention on Climate Change [Online]. Disponível em: <<http://newsroom.unfccc.int/es/>>. Acesso em: 23/10/2017.

USEPA. Landfill Gas Emissions Model (LandGEM) and User's Manual, Version 3.02. U.S. EPA, Office of Research and Development and Clean Air Technology Center. EPA/600/R-05-047. Washington, D.C.: U.S. Environmental Protection Agency, 2005.

VALENTE, V. B. Análise de viabilidade econômica e escala mínima de uso do biogás de reatores anaeróbios em Estações de Tratamento de Esgoto no Brasil. **Dissertação** (Mestrado) - Programa de Planejamento Energético. Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2015.

VON SPERLING, M. **Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos**. 3ª ed. Belo Horizonte. Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental; Universidade Federal de Minas Gerais; 2005.

WOOTTON, P. Assessment of Australian Biogas Flaring Standards, Brisbane: RIRDC. 2008.

WORLD RESOURCES INSTITUTE (WRI); CENTRO DE ESTUDOS EM SUSTENTABILIDADE (GVCES). Especificações do Programa Brasileiro GHG Protocol: Contabilização, Quantificação e Publicação de Inventários Corporativos de Emissões de Gases de Efeito Estufa. 2008.

WUNDERLIN, P., MOHN, J., JOSS, A., EMMENEGGER, L. and SIEGRIST, H. Mechanisms of N<sub>2</sub>O production in biological wastewater treatment under nitrifying and denitrifying conditions. In: **Water Research** 46(4), 1027-1037, 2012.